

ارزیابی ظرفیت باربری خاک رس تقویت شده با ستون‌های اختلاط عمیق و کلاهدک ژئوتکستایل با آزمایشات بزرگ مقیاس و شبکه‌های عصبی مصنوعی

مقاله علمی - پژوهشی

فرزاد پور ابراهیم، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
سید یعقوب ذوالفقاری فر*، دانشیار، گروه مهندسی عمران و معماری، دانشکده صنعت ساختمان و محیط زیست،

واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sy.zolfegharifar@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۴۳۹-۴۶۴

چکیده

ستون‌های اختلاط عمیق خاک (DSM) یکی از روش‌های بهبود عملی در جهان برای مقاومت و ظرفیت باربری زمین در پروژه‌های بهسازی زمین و توسعه مناطق شهری می‌باشد که در مقایسه با استفاده از تکنیک‌های سنتی برداشت خاک و جایگزینی، یا ابنیه نگهبان، فونداسیون‌های عمیق و تقویت خاک، جایگزین جذابی است که تأثیر نامطلوب کمتری بر محیط زیست دارد. مواد افزودنی تثبیت کننده شیمیایی مانند سیمان یا آهک با استفاده از یک مته محور توخالی مکانیکی برای ایجاد ستون‌های سیمانی و اصلاح خاک به خاک تزریق می‌شوند. هدف این تحقیق بررسی آزمایشگاهی بزرگ مقیاس و استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین ظرفیت باربری خاک رس بهبود یافته با ستون‌های اختلاط عمیق سیمان منطقه دولت آباد شهر یاسوج واقع در استان کهگیلویه بویراحمد کشور ایران بود. ابتدا مشخصات اولیه ژئوتکنیکی بستر خاک نرم رسی توسط آزمون‌های آزمایشگاهی اولیه از قبیل دانه بندی، درصد رطوبت طبیعی، حدود اتربرگ، PH مقاوم فشاری تک محوری بدست آمد. سپس نمونه‌های خاک تثبیت شده با درصد‌های متفاوت آهک و سیمان جهت تعیین درصد مقدار رطوبت بهینه و مقدار افزودنی بهینه توسط آزمایشات تراکم استاندارد و مقاومت فشاری تک محوری جهت اعمال در ساخت ستون‌های اختلاط عمیق خاک در حالات بدون و با کلاهدک ژئوتکستایل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش مقدار سیمان، مقاومت تک محوری در نمونه‌های مخلوط با سیمان به طور چشمگیری افزایش یافت. در هر نمونه خاک تثبیت شده، با افزایش زمان بعمل آوری، مقاومت افزایش یافت. در مرحله دوم با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی، نمودارهای بار - نشست برای هر سناریو پس از ساخت ستون‌های سیمانی با ابعاد مناسب برای مدل آزمایشگاهی، پیکربندی‌های مختلف ستون‌های سیمانی و شرایط بدون و با کلاهدک ژئوتکستایل بر روی ستون‌های سیمانی ایجاد شد. مطالعات آزمایشگاهی بزرگ مقیاس برای تعیین ظرفیت باربری ستون‌های اختلاط عمیق نشان داد که وجود ستون‌های سیمانی می‌تواند ظرفیت باربری پی را تا ۱۸ برابر در مقایسه با عدم وجود آنها افزایش دهد. اعمال لایه کلاهدک ژئوتکستایل بر روی ستون‌های سیمانی، مزایای وجود کلاهدک ژئوتکستایل را نشان داد. در تغییر شکل ثابت ۳۰ میلی‌متر، حداکثر بار عمودی اعمال شده به ترتیب برابر ۱۸/۳۷ و ۲۴/۵۹ کیلونیوتن در حالات بدون و با کلاهدک ژئوتکستایل بود که افزایش ۳۳ درصدی در میزان بار اعمالی را نشان داد. مقایسه هر چهار فرم مجزا از تحقیقات شبکه عصبی مصنوعی با مقدار همبستگی ۰/۹۴ برای هر دو شبکه آموزشی و آزمایشی سطح قابل قبولی از دقت را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های عصبی مصنوعی، آزمایشات بزرگ مقیاس، ستون‌های سیمانی، خاک رس، اختلاط عمیق خاک

۱- مقدمه

ستون‌های اختلاط عمیق خاک و سیمان برای پروژه‌های بهسازی مقاومت و ظرفیت باربری زمین در مقایسه با استفاده از تکنیک‌های سنتی برداشت خاک یا دیوارهای نگهبان، فونداسیون‌ها عمیق و تقویت خاک، جایگزین جذابی است که تأثیر نامطلوب کمتری بر محیط زیست دارد. در حال حاضر، "اختلاط عمیق خاک" که شامل ترکیب مکانیکی خاک و چسب با تیغه‌های اختلاط است، و "گروتینگ جت" که شامل شکستن و سست کردن زمین

۲-پیشینه تحقیق

روش اختلاط عمیق خاک برای اولین بار در کشورهای اسکاندیناوی و ژاپنی در حدود سال ۱۹۷۰ مورد استفاده قرار گرفت. روش روش اختلاط عمیق به شدت به عنوان یک جایگزین سازگار با محیط زیست برای روش تزریق جت و روش مرسوم در محل شمع به دلیل استفاده از مواد افزودنی غیر سمی به خاک و کاهش حجم پساب (فناد) ترویج شده است (Gupta & Kumar, 2023). ستون‌های اختلاط عمیق به طور قابل توجهی سفتی خاک و ضرایب میرایی را کاهش می‌دهد و آن را برای محاسبات اولیه پی تحت پی‌های اصلاح شده مفید می‌کند (Ter-Martirosyan, Sidorov & Sobolev, 2022). پایه‌های DSM می‌توانند به مقاومت برشی بالاتری نسبت به محدودیت‌های فعلی دست یابند و آنها را به یک جایگزین مقرون‌به‌صرفه برای پایه‌های فولادی در حفاری‌های عمیق تبدیل می‌کند (Vervoom & Barros, 2021). این روش طبق قوانین قانونی مانند FHWA یا استاندارد اروپایی EN14679 اجرا و کنترل می‌شود. اختلاط عمیق تکنیکی است که معمولاً برای خاکریزها بر روی خاک‌های نرم، پایداری شیب، پشتیبانی از زیر نوار و پایه‌های شعاع، پایه‌های پل و توربین‌های بادی، دیوارهای حفاری ساخته شده از ستون‌های سیمانی-سیمانی تقویت شده و دیواره‌های آب‌بندی روغن‌کاری مانند دیواره‌های بریده استفاده می‌شود. در پایان، اختلاط عمیق از انتشار آلاینده‌ها جلوگیری می‌کند (Amrioui, Duc, Le Kouby, Guedon, Saussaye, Hemmati, & Dokladal, 2023). سیمان خاک پس از فناوری اختلاط عمیق خاک، توجیه اقتصادی ترین روش برای تقویت پایه های سیلوهای فلزی است، در حالی که تزریق جت برای تقویت ضخامت خاک محلی مناسب است و تزریق و ریزشمع ها برای بازسازی در دسترسی محدود مناسب هستند (Butenko, Mozgovyi, Butnik & Spirande, 2022). به گفته سوبولف و همکاران (Sobolev, Berezin, & Kechina, 2021)، یک پی دال با پایه تقویت شده با استفاده از اختلاط عمیق خاک موثرتر از پی شمع برای بارهای لرزه ای در ساختمان های چند طبقه است. اختلاط

با یک جت سیال با انرژی جنبشی بالا و مخلوط کردن آن با یک چسب است، دو روش رایج اجرا هستند. "بتن" از طریق این فرآیند ایجاد می‌شود و زمین به عنوان سنگدانه عمل می‌کند. بهبود خاک اغلب برای کاهش تأثیر ساخت و ساز بر سازه‌های زیرزمینی مجاور مانند پی ساختمان مجاور، خطوط لوله و تونل‌های جاری، زمانی که یک گودبرداری عمیق در قلب یک منطقه شهری ساخته می‌شود، ضروری است (Hu, 2003). روش اختلاط عمیق خاک به طور گسترده‌ای برای ساخت سازه‌های نگهدارنده گودبرداری‌ها و جلوگیری از تغییر شکل ناشی از گودبرداری‌های عمیق به دلیل هزینه کم استفاده شده است (Hu, 2003; Wang and W. Wang, 2010). علاوه بر این، اختلاط عمیق خاک از نظر زیست‌محیطی بی‌خطر است، زیرا برخلاف تکنیک‌های مرسوم (شمع‌های حفر شده، دیوارهای حائل، دیوارهای نگهدارنده)، به حرکت کمی یا بدون حرکت خاک نیاز دارد و مانند بتن معمولی نیازی به استخراج منابع سنگدانه‌ای ندارد. روش اختلاط عمیق ظرفیت باربری خاک‌های نرم چسبنده را در مقایسه با خاک‌های بهبود نشده ۲۹ تا ۷۹ درصد بهبود می‌بخشد (Bunawan, Momeni, Armaghani, & Rashid, 2018). با این وجود، نصب DSM خود خاک بومی را درگیر می‌کند و بر منطقه اطراف تأثیر می‌گذارد. این اثرات می‌تواند منجر به حرکات زمین (Chai, Carter, & Hayashi, 2005; Chai, Carter, Miura, & Zhu, 2009)، فشار اضافی آب منفذی (Wang, Shen, & Modoni, & Zhou, 2020; Fang, & Yin, 2007) و حتی تغییر در خواص خاک اطراف شود (Shen, Zhang, & Guo, Ray, & He, 2010). حرکت زمین و فشار بیش از حد آب منفذی می‌تواند بر زیرساخت‌های قنات مجاور، به ویژه خطوط لوله و تونل‌های محافظ تأثیر بگذارد. روش‌های کنترل کیفیت کلیدی برای اختلاط عمیق خاک شامل آزمایش‌های مخلوط آزمایشگاهی، تأسیسات آزمایشی مزرعه‌ای، نظارت و کنترل پارامترهای ساخت‌وساز در طول تولید، و تأیید با اندازه‌گیری ویژگی‌های مهندسی است (Terashi & Kitazume, 2011).

تبادل کاتیونی، چروکیدگی و تورم دارد. خاک‌های مصنوعی یکسان در مطالعه‌ای توسط Szymkiewicz, Barrett, (2015) بر اساس چهار ترکیب آزمایش شده توسط سزمیکویچ (۲۰۱۵) و بیش از هشت مخلوط با محتوای سیمان متغیر که توسط هلسون (Helson, 2017) ارزیابی شده است، بهترین مقاومت زمانی حاصل شد که ۲۵٪ از یک رس کائولینیت برای همان غلظت سیمان به خاک اضافه شد. رفتار ذرات آماده شده و سهم چسبندگی زهکشی نشده خاک رس این حالت بهینه را توضیح داد. بر اساس تحقیقات پوراابراهیم و ذوالفقاری فر (Pourebrahim & Zolfegharifar, 2022)، مخلوط ۱۰ درصد آهک و ۴ درصد سیلیکات سدیم استحکام و دوام خاک را در اختلاط عمیق خاک با حداکثر مقاومت تک محوری ۲۴۷ کیلو پاسکال بهبود بخشید. اسماعیلی و همکاران (Esmaili, Astaraki, Yaghouti & Rad, 2021) همچنین نشان داد که افزودن ۱۵ درصد میکرو سیلیس به ستون‌های اختلاط خاک عمیق در ماسه خشک شور به طور قابل توجهی خواص مکانیکی را بهبود می بخشد و زیرساخت‌ها را برای زیرساخت‌های حمل و نقل تثبیت می‌کند. سنگیتا و همکاران (Sangeetha, Dalshica & Nasvi, 2022) به این نتیجه رسیدند که ترکیب خاکستر بادی در خاک گسترده به طور قابل توجهی فشار تورم را کاهش می‌دهد و آن را به یک تکنیک اختلاط عمیق خاک برای تثبیت این خاک‌ها تبدیل می‌کند. به گفته لیو و همکاران (Liu, Wang, Liang, Chen & Zhou, 2023)، زمانی که محتوای سیمان بین ۱۵ تا ۲۵ درصد بود، مقاومت فشاری ابتدا با افزایش محتوای سیلت افزایش یافت، اما با رسیدن محتوای سیلت به نقطه «اشباع» کاهش می‌یابد. نویسندگان توضیح دادند که افزایش اندازه منافذ ناشی از محتوای بالای سیمان و سیلت تا حدودی استحکام بدست‌آمده از افزایش محصول سیمانی را جبران می‌کند. به گفته المدانی و دهقانان (Almadani & Dehghanian, 2022)، تحلیل‌های عددی دوبعدی و مدل‌سازی منعکس‌کننده شرایط فعلی سایت می‌تواند نتایج

عمیق در ساختمان‌های فراساحلی و فراساحلی برای ساخت موج شکن‌ها، لنگرگاه‌ها و دیوارهای ساحلی استفاده می‌شود.

این تکنیک در شالوده بسیاری از ساختمان‌ها از جمله آسمان خراش‌ها، دیوارهای حائل، مخازن، برج‌ها، پایه‌های پل، خاکریزها و تجهیزات زیرزمین اعمال می‌شود (Zuo, Wang, Li, Han, Wang, & Zhang, 2023).

از آنجایی که بهبود خاک پس از اختلاط مواد رخ می‌دهد، خاک منسجم حاوی خاک رس بر خلاف سنگدانه‌های معمولی که خشی هستند و با هیچکدام از آنها واکنش نشان نمی‌دهند، چالش برانگیز است (Chen, Zhang, Zhang, Zhu & Wang, 2013). خاک با محتوای رس متناسب می‌تواند با سیمان و آب برهم کنش داشته باشد. انقباض و تورم دو فرآیند دیگر هستند که ممکن است زمانی رخ دهند که خاک حاوی خاک رس باشد (Tatarniuk, 2014; Alipour, Khazaei, Pakbaz & Ghalandarzadeh, 2017). اختلاط عمیق به طور قابل توجهی کیفیت خاک رس نرم را با افزایش ظرفیت باربری و به حداقل رساندن نشست، با نتایج قابل مقایسه با پی‌های شمع، بهبود می‌بخشد (Al-Qaisi & Al-Waily, 2022). هادی و زایکا نشان دادند که نسبت سطح بالاتر اختلاط عمیق خاک، مقادیر جابجایی کمتری را فراهم می‌کند، با نسبت مساحت ۰،۴ برای جابجایی و مدت زمان تحکیم در خاک رسی گسترده موثر است (Hadi & Zaika, 2022).

با توجه به این جنبه‌های خاص، تکرار نتایج بدست‌آمده در سایت‌های ساختمانی در یک محیط آزمایشگاهی دشوار است. اگر همبستگی واضحی بین نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی و نتایج درجا وجود نداشته باشد، پیش‌بینی‌های انجام شده با استفاده از آن آزمایش‌ها بی‌ربط هستند. برای ارائه پاسخ، دانشمندان در یک آزمایشگاه تقلید می‌کنند که چگونه محتوای خاک رس بر ویژگی‌های فیزیکی خاک تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، با استفاده از خاک‌های مصنوعی در یک آزمایشگاه، یک بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد خاک-سیمان انجام شد. این خاک مصنوعی از نسبت‌های مختلف کائولینیت اسپس سفید و ماسه فونتنبلو ساخته شده است. این رس توانایی کمی برای

دیگری مانند خاکریزها روی آنها ساخته می‌شود، بررسی کرد. از جمله نوآوری‌های این تحقیق استفاده از کلاهک‌های ژئوتکستایل برای توزیع یکنواخت بارهای اعمالی و تثبیت خاک و همچنین مدلسازی و شبیه‌سازی رفتار خاک‌های رسی تثبیت شده با ستون‌های سیمانی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بود.

۳-مواد و روش تحقیق

آزمایشات اولیه مانند دانه بندی، حدود اتربرگ و PH برای شناسایی خواص خاک پایه انجام شد. در ادامه، و آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین مقاومت و ظرفیت باربری برای خاک تثبیت استفاده شد. سپس فرآیند انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی گسترده برای تعیین ظرفیت باربری ستون‌های اختلاط عمیق با ایجاد نمودارهای بار - نشست بررسی شد و نتایج داده‌های اولیه از آزمایش‌های آزمایشگاهی و روش تحلیل شبکه عصبی مصنوعی مورد بحث قرار گرفت.

۳-۱- آزمایشات آزمایشگاهی اولیه روی خاک

۳-۱-۱- آماده سازی نمونه

با هدف قابلیت توسعه ساخت و ساز شهری در آینده، چند مکان از منطقه دولت آباد شهر یاسوج واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد دارای خاک نرم و سست خاک برای تعیین کیفیت مقاومتی و ظرفیت باربری و استفاده در این برای این تحقیق در نظر گرفته شد (شکل ۱). برای انجام آزمایشات، نمونه‌های خاک‌های به مدت یک هفته در فضای باز گذاشته شدند تا رطوبت سطح تبخیر شود و خاک در هوا خشک شود. پس از آن، خاک پایه در کیسه‌های پلاستیکی با دو جداره قرار داده شد. برای شمع‌های بزرگ مقیاس و توالی انجام آزمایش‌های اولیه انجام شده بر روی خاک پی قبل از انجام آزمایش‌های تثبیت و بهبود خاک برنامه ریزی شد، که نحوه انجام آزمایشات به صورت ادامه شرح داده می‌شود.

واقعی را برای اختلاط عمیق در خاک‌های رسی نرم در صورتی که خواص خاک به خوبی و به درستی انتخاب شود، بدست می‌آورد. شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی انحراف دیوار حائل، حفاری، رفتار خاک، سازه‌های نگهدارنده زمین، خصوصیات مکان، پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع و موارد دیگر در مهندسی ژئوتکنیک به خوبی تثبیت شده‌اند. آنها می‌توانند خاک را به طور دقیق طبقه بندی کنند، توده سنگ را گروه بندی کنند، پایداری شیب را پیش بینی کنند، و نشست‌های پیش بینی شده با ارزش نزدیک به واقعی را در مهندسی ژئوتکنیک ایجاد کنند (Moayedi, Mosallanezhad, Rashid, Jusoh, & Muazu, 2020; Chao, Ma, Zhang, Zhu & Hu, 2018). با توجه به بارهای استاتیکی و چرخه ای ترکیبی، مدل‌های ANN می‌توانند به طور دقیق نشست پی‌های نواری کم عمق را بر روی خاک‌های دانه‌ای تخمین بزنند (Sasmal & Behera, 2018). شبکه‌های عصبی مصنوعی همچنین می‌توانند تکنیک‌های اختلاط عمیق را بهینه کنند و پیش‌بینی‌های رضایت‌بخشی را در مورد استحکام خاک با شرایط مختلف اختلاط ارائه کنند (Hosseini, Mojtahedi & Sadeghi, 2020). اختلاط عمیق خاک می‌تواند از به‌کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، که نقشه‌های ورودی-خروجی به دست آمده از سیستم‌های کنترل زمان پیوسته غیرخطی را تقریبی می‌کند، بهره‌مند شود (Agrachev & Sarychev, 2022). نوگروهو و همکاران بیان کردند استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) در اختلاط عمیق خاک می‌تواند به تخمین دقیق و کارآمد مقادیر تست نفوذ استاندارد در خاک منسجم منجر شود (Nugroho, Fernando & Suryanita, 2022).

این مطالعه به بررسی اثرات اختلاط عمیق ستون‌های سیمانی بر ظرفیت باربری خاک‌های کائولین توسط نمونه‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس و شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی چند محل از خاک‌های نرم و سست منطقه دولت آباد شهر یاسوج پرداخت. در این مطالعه رفتار ستون‌های سیمانی اختلاط عمیق را برای بهبود ظرفیت باربری بسترهای خاک نرم زمانی که یک سازه یا پروژه‌های

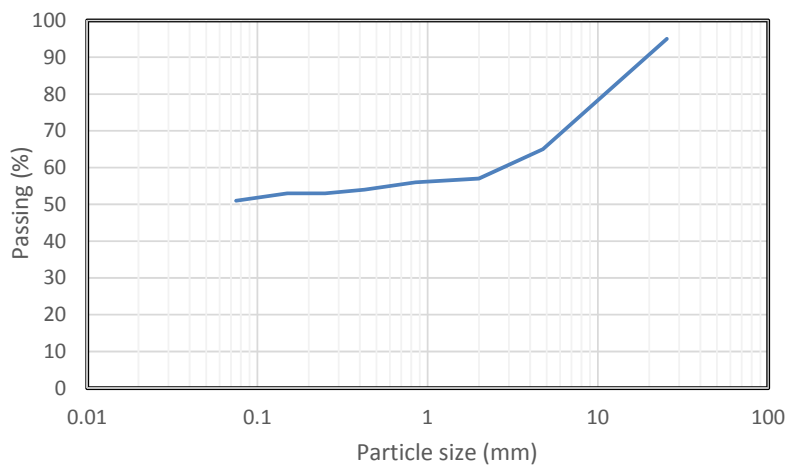


شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در نزدیکی شهر یاسوج

۳-۱-۲- آزمایش دانه بندی خاک

قطعات سنگ خرد شده، خاک رس و سایر مواد آلی و غیر آلی دانه‌ای همگی می‌توانند تحت آزمایش دانه بندی قرار می‌گیرند.

آزمایش دانه بندی خاک منطقه مورد مطالعه با استفاده از استاندارد ASTM-D422 انجام شد که نتایج آن مطابق نمودار شکل ۲ می‌باشد. توزیع اندازه دانه‌ها بویژه در تمام پروژه‌های اجرایی و تحقیقاتی ژئوتکنیکی برای بررسی تاثیر رفتار مهندسی مواد دانه‌ای بررسی می‌شود. شن و ماسه،

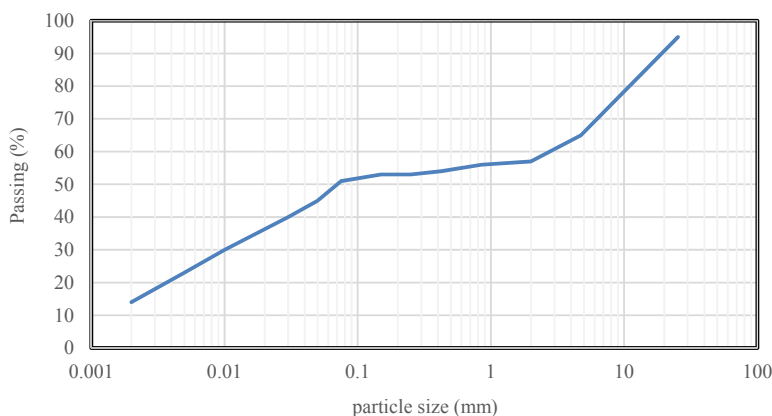


شکل ۲. نمودار نتایج آزمایش دانه بندی خاک

۳-۱-۳ آزمایش هیدرومتری

دانه‌های خاک فرض می‌شود. قانون استوکس میانگین سرعت دانه را به دست می‌دهد (Das, 2011). در حالی که ذرات خاک پراکنده می‌شوند، یک هیدرومتر در آب غوطه‌ور می‌شود که امکان اندازه‌گیری وزن مخصوص خاک و آب معلق در عمق L را فراهم می‌کند. این عمق همچنین امکان اندازه‌گیری قطر ذرات در حال سقوط را فراهم می‌کند.

آزمایش هیدرومتری یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تخمین اندازه ذرات عبوری از الک شماره ۲۰۰ عبوری است. آزمایش هیدرومتری انجام شده بر روی نمونه خاک مورد استفاده در این مطالعه با استفاده از روش استاندارد ASTM-D422 انجام شد. نتایج آزمایش بدست آمده بر روی کاغذ نیمه لگاریتمی ترسیم شد (شکل ۳). نمونه خاک بعنوان بخشی از آزمایش هیدرومتری خاک به صورت جداگانه در آب قرار می‌گیرد. ماهیت کروی

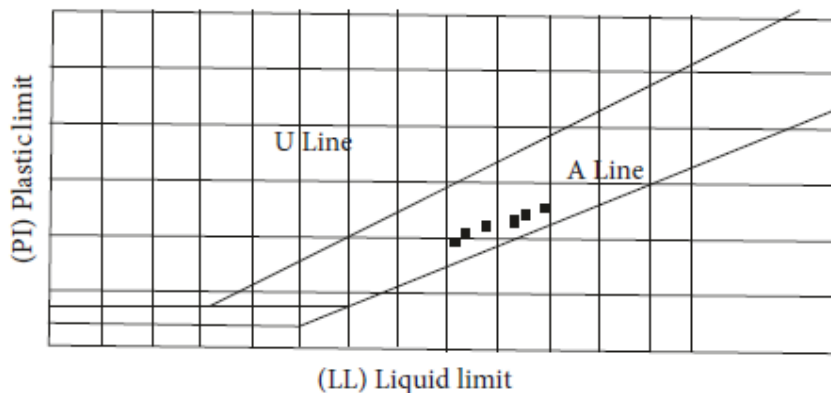


۳. نمودار نتایج آزمایش هیدرومتری خاک

۳-۱-۴- آزمایشات حدود اتربرگ

خاک استاندارد سازی کرده بود را توسعه داد. خاک‌های ریزدانه به میزان آبی که جذب می‌کنند، شرایط مختلفی دارای چهار مرحله رفتاری هستند که با حدود مرزی حد خمیری، مایع و نیمه سخت (جامد) مشخص می‌شوند. نمودار یافته‌های حاصل از نتایج آزمایشات حدود اتربرگ در شکل ۴ آمده است.

آزمایشات حدود اتربرگ مطابق روش استاندارد ASTM-D4318 انجام شد. آلبرت اتربرگ، شیمیدان سوئدی، ایده محدودیتهای آزمایشات اتربرگ برای آستانه مشخص رطوبت خاک برای حد انقباض (SL)، حد خمیری (PI) و حد مایع (LL) که کاساگرانده آن را در سال ۱۹۳۲ در علم مکانیک

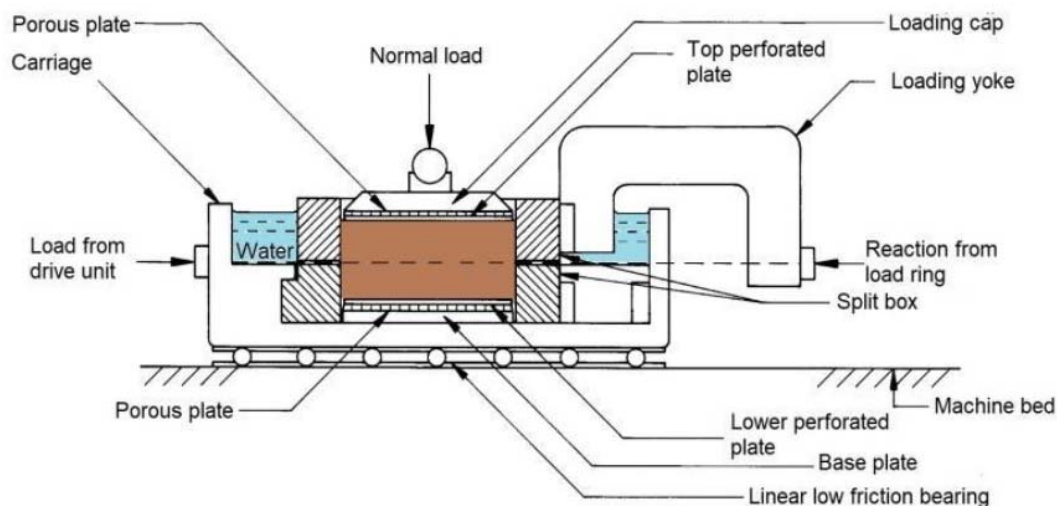


شکل ۴. نمودار نتایج پراکنندگی آزمایشات حدود اتربرگ خاک

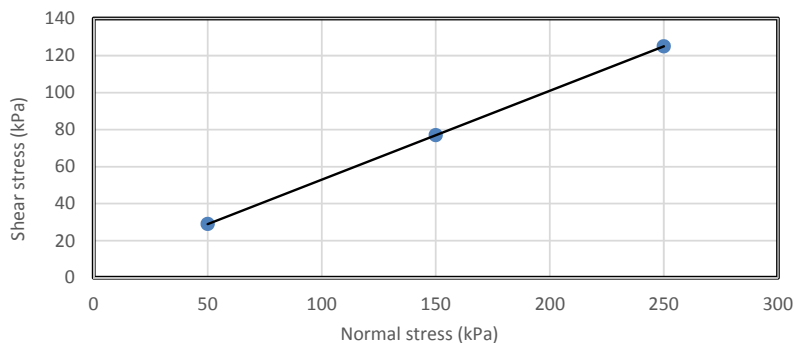
۳-۱-۵- آزمایش برش مستقیم

شده است. نمودار نتایج آزمایشات برش مستقیم در شکل ۶ آمده است.

آزمایشات برش مستقیم طبق روش دستورالعمل‌های استاندارد ASTM-D3080 انجام شد. اجزاء آزمایش برش مستقیم خاک و اعمال تنش‌های برشی و عمودی در شکل ۵ ارائه



شکل ۵. اجزای تشکیل‌دهنده آزمایش برش مستقیم خاک و نحوه اعمال بارهای برشی و قائم



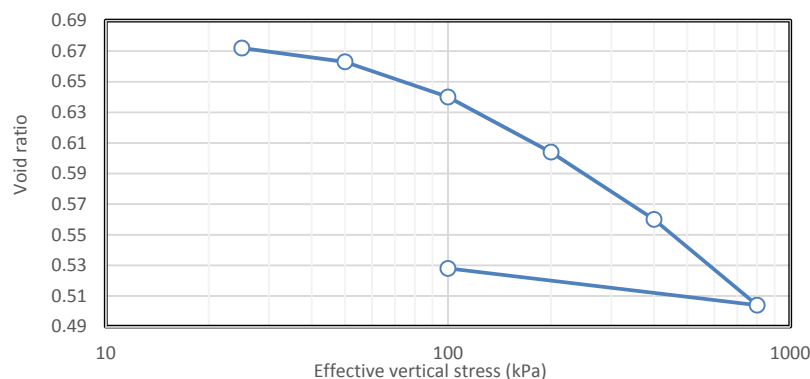
شکل ۶. نمودار نتایج آزمایشات برش مستقیم خاک مورد مطالعه

۳-۱-۶- آزمایش تحکیم

شدن در این فرآیند است. تحکیم و نشست خاک ارتباط تنگاتنگی با زهکشی (تغییر فشار آب منفذی) و سرعت بارگذاری (حذف تدریجی فشار آب منفذی) دارد.

نمودار نتایج آزمایشات تحکیم در شکل ۷ طبق استاندارد ASTM-D2435 نشان داده شده است.

نحوه انجام آزمایشات تحکیم طبق روش استاندارد ASTM-D2435 انجام شدند. پدیده تحکیم زمانی شروع می‌شود که فشار بیش از حد آب منفذی ناشی از فشار روباره در داخل خاک ایجاد می‌شود. تا زمانی که زهکشی باعث از بین رفتن این فشار بیش از حد شود، ادامه خواهد داشت. در نتیجه، تحکیم کاهش آهسته حجم خاک اشباع شده با نفوذپذیری کم است که به دلیل چکیدن مقداری آب از سوراخ‌ها، تغییر ضخامت خاک و ته نشین



شکل ۷. نمودار نتایج آزمایشات تحکیم خاک

از یک برنامه تحقیقاتی سفارشی برای آزمایشهای آزمایشگاهی برای درک بهتر برنامه اختلاط مورد نیاز در ستونهای سیمانی استفاده می‌کند. نمونه‌های خاک رس اولیه در این برنامه در حالی که مواد تثبیت کننده در این مورد خاک رس کائولن، سیمان و پودر سیلیکات سدیم در حال بازی بودند، در آزمایشگاه ارزیابی شدند. برنامه آزمایشگاهی مورد استفاده در نیمه دوم این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. جهت جمع‌آوری اطلاعات درخصوص وضعیت ثبت و انتقال اطلاعات طراحی در پروژه‌های طراحی و ساختمانی از پرسشنامه‌ای مشتمل بر ۲۵ سوال استفاده شد که به منظور تعیین پایایی آن از رابطه آلفا کرونباخ استفاده شد. به منظور برآورد پایایی و دقت ابزار سنجش از تکنیک ضریب آلفای کرونباخ بهره گرفته شده است. مقدار آلفای مورد قبول برای پایایی پرسشنامه، می‌بایست عددی بالاتر از ۰/۷ بدست آید.

بدین منظور ضریب پایایی، از طریق نرم افزار SPSS محاسبه شد. با توجه به نتیجه آزمون، مقدار آلفای کرونباخ برای پرسشنامه برابر ۰/۷۱ بدست آمد که نشان دهنده همسازی درونی و پایایی مناسب پرسشنامه است. به منظور تعیین اعتبار و روایی پرسشنامه از تکنیک روایی صوری و قضاوت داوران استفاده شده است. به این منظور سوالات پرسشنامه پس از نظرخواهی با چند تن از استادان و متخصصین مربوط و با توجه به اظهار نظر آنان سوالات نهایی انتخاب و پرسشنامه تنظیم گردید.

۳-۱-۷- آزمایش PH

روش استاندارد ASTM-D4972 روشی مبنایی برای انجام آزمایشات تعیین میزان اسیدیته خاک است که در این تحقیق استفاده شد. مقدار اسیدیته خاک می‌تواند فرآیند تثبیت و بهبود خاک را تحت تاثیر قرار دهد و خاک‌های اسیدی احتمال تثبیت و بهبود مقاومتی کمتری دارند. برای انجام واکنش‌های مورد نیاز برای تثبیت شیمیایی در محیط قلیایی و در نهایت موفقیت در افزایش مقاومت خاک نیازمند ایجاد شرایط قلیایی است. نتایج آزمایشات تعیین میزان اسیدیته خاک مورد تحقیق، مقدار pH خاک را بطور متوسط ۷/۲ نشان داد.

۳-۱-۸- آزمایشات آزمایشگاهی بزرگ مقیاس تثبیت خاک
آزمایش‌های تثبیت خاک و فشار تک محوری در مقیاس بزرگ برای بررسی اجزای اصلی مورد استفاده برای ساخت ستون‌های سیمانی در آزمایشگاه انجام شد. روش استاندارد که در کارهای تحقیقاتی متعددی از جمله گالو و همکارانش در سال ۲۰۱۷ توضیح داده شده است، استفاده شد (Güllü, Canakci & Al Zangana, 2017). و مویدی و همکاران در سال ۲۰۱۳ (Moayed, Kazemian & Huat, 2013)، مبنای تهیه نمونه خاک منجمد شده در آزمایشگاه را ارائه دادند که روش انجمن ژئوتکنیک ژاپن اساس اکثر این تکنیک‌ها است. روش ایجاد و جابجایی یک نمونه استوانه‌ای شکل از خاک اصلاح شده و عاری از تراکم توسط این استاندارد کنترل می‌شود. این تحقیق

جدول ۱. برنامه آزمایشگاهی تثبیت اولیه خاک

Primary materials before stabilization	stabilizer	Unit of stabilizer	Stabilizer weight percentage				
			5	10	15	20	25
Clay	Cement	Percentage of soil dry weight	10	8	6	4	2
Clay	Lime		10	8	6	4	2
Clay+ 5% of selected cement	Sodium silicate		10	8	6	4	2
Clay+ 5% of selected lime	Sodium silicate		10	8	6	4	2

اگر دیوار نمونه ناهموار یا روغن کاری نشده باشد، ممکن است به نمونه آسیب برساند. سه لایه از مخلوط خاک اضافه می‌شود تا زمانی که قالب پر شود. پس از افزودن هر لایه مخلوط، قالب تکان داده می‌شود تا هرگونه حباب هوای محبوس شده از بین برود. پس از اعمال یک صفحه پلاستیکی نازک بر روی سطح بالایی نمونه، در دمای ۲۳ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۹۵ درصد عمل آوری شد. نمونه را می‌توان پس از چند روز سخت شدن از قالب خارج کرد و با همان پارامترها محکم کرد. سه زمان بعمل آوری نمونه بصورت ۷، ۲۱ و ۳۰ روزه انجام شد. تحقیقات تثبیت خاک در مقیاس بزرگ از زمان بعمل آوری نمونه‌ها انجام شد. آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری آخرین روشی بود که برای ارزیابی نمونه استفاده شد و نتایج مقاومت تک محوری چسبندگی زهکشی نشده اندازه‌گیری شد. این احتمال وجود دارد که هیچ کرنش محصور و وجود نداشته باشد و زاویه اصطکاک داخلی در این شرایط صفر باشد. در نتیجه، انسجامی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، نشان‌دهنده مقاومت برشی نمونه خاک تثبیت شده است و ممکن است برای مقایسه مقاومت‌های نمونه‌ها استفاده شود. در شکل ۸ روش‌های آماده سازی خاک پی، ترکیب آن با عوامل تثبیت کننده و بسته بندی مخلوط حاصل در قالب‌های استوانه‌ای در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. مخلوط خاک و مواد تثبیت کننده با استفاده از همزن برقی تهیه شد. رویه توصیف شده در تحقیق کیتازومه و تراشی (Kitazume & Terashi, 2013) برای پردازش نمونه اعمال شد. لازم به ذکر است که محققان متعددی از جمله گولو (Güllü, 2017)، وارن (Warren, 2011)، لین و وانگ (Lin & Wong, 1999) و جامسوانگ و همکاران (Jamsawang, Voottipruex, Boathong, Mairaing & Horpibulsuk, 2015)، این استراتژی را به کار گرفته‌اند. این رویکرد پس از روز اول، نمونه‌ها را از قالب‌ها به ظروف کوچک و بسته منتقل می‌کرد. هدف این تلاش حفظ رطوبت

در شرایط ساخت و ساز، آب شهری باید به عنوان آب اختلاط برای آزمایش اختلاط آزمایشگاهی استفاده شود. آب در ابتدا در محققان متعددی پیشنهاد کردند، هنگام اختلاط آب به خاک اضافه شود تا میزان رطوبت آن مشخص شود. لازم بذکر است که هر نمونه با حجم معینی از آب ساخته می‌شود (Farooq, Suh, Park & Yang, 2015). نکته کلیدی در منابع علمی این است که هنگام مخلوط کردن مواد تثبیت کننده مانند سیمان با مخلوط آب، حباب‌های هوا ایجاد می‌شود. این حباب‌های هوا حتی پس از مخلوط شدن نمونه خاک در آن باقی می‌ماند و نمونه را ضعیف می‌کند. در مقابل، نسبت آب به سیمان پایین (۰/۸ و ۱) به دلیل مواد تزریق پایین از نظر ذهنی، چالشی را ایجاد خواهد کرد. در نتیجه، یک بررسی قابل مقایسه در این مطالعه با استفاده از نسبت مخلوط آب به سیمان ۱ به ۳ انجام شد و سپس تثبیت کننده را به خاک اضافه شد و بمدت ۱۰ دقیقه طبق پیشنهاد استاندارد انجمن ژئوتکنیک ژاپن (۲۰۰۲) هم زده شد (Güllü, 2017). ده دقیقه اختلاط بر اساس زمان شروع سخت شدن و ملاحظات همگن مناسب توصیه می‌شود (Terashi, 1999). قالب نمونه با قطر ۵ سانتیمتر و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر با مخلوط خاک پر شد. به طور طبیعی، قالب‌های بزرگتر نیز ممکن است مورد استفاده قرار گیرد و ارتفاع و قطر نمونه باید دقیقاً ۲ به ۱ باشد. پیشنهاد استاندارد ASTM D2166 و مطالعات علمی منتشر شده به عنوان پایه‌ای برای این مشکل عمل می‌کند. گریس کاری و روان کردن قالب را قبل از افزودن نمونه خاک انجام شد و پس از خشک شدن و جامد شدن، برداشتن آن را آسان تر می‌کند. توجه به این نکته مهم است که نمونه‌ها در طول واکنش‌های هیدراتاسیون و مرحله تثبیت تحت "چروک شدن" یا از دست دادن مقداری آب قرار می‌گیرند. این به طور طبیعی به حذف آسان نمونه از قالب کمک می‌کند (Tang, Shi, Gao, Chen & Cai, 2007).

می‌آید. به طور همزمان، قیچی یا هر جسم تیز به راحتی می‌تواند قالب اصلی را از بین ببرد. بنابراین، تحت تأثیر شرایط ساخت و فرآوری، خود نمونه هیچ مقاومتی را از دست نمی‌دهد یا از دست نمی‌دهد (شکل ۹). نمونه‌ها به این ترتیب در دمای اتاق (بدون سربار) به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری شدند. پس از دوره آماده سازی، نمونه‌ها از ظروف پلاستیکی خود خارج شدند و تحت آزمون مقاومت فشاری تک محوری ASTM D2166 قرار گرفتند.

اولیه خاک تثبیت شده برای استفاده در فرآیند تثبیت است. در تمام روش‌های ذکر شده در بالا، نمونه‌های تثبیت شده به دلیل تلاش برای فرار از قالب اولیه شکسته یا در لبه‌ها ترک می‌خورند یا حتی فشرده می‌شوند. این امر به ویژه در روزهای اولیه پس از تولید نمونه، زمانی که نمونه هنوز استحکام اولیه مناسب را ندارد، صادق است. در این تحقیق از قالب‌های پلاستیکی ویژه‌ای استفاده شد، که کمترین اصطکاک را با نمونه‌های تولید شده در دیواره‌های خود ایجاد می‌کنند تا این مسائل به حداقل برسد. در صورت نیاز، نمونه‌ها نیز به راحتی قبل و بعد از زمان پردازش قابل استفاده هستند. از آن پدید



شکل ۸. مراحل اختلاط مواد تثبیت کننده تحقیق



شکل ۹. مراحل آماده سازی، اختلاط، نمونه‌سازی و فرآوری

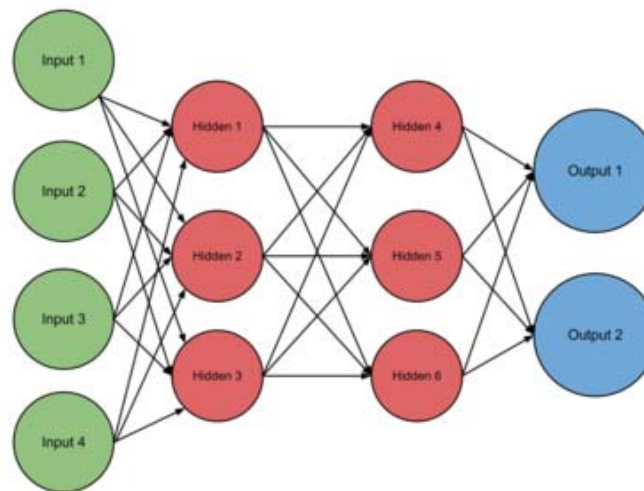
و ویژگی‌های مغز انسان هستند. همه این مدل‌ها یک ساختار ریاضی را در نظر می‌گیرند که چندین پارامتر و پیچ تنظیم دارد و البته ممکن است به صورت گرافیکی نمایش داده شود. یک الگوریتم یادگیری یا آموزش این ساختار کلی را تنظیم و بهینه

۲-۴- مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) انواع مختلفی از مدل‌های محاسباتی تحت عنوان کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی ارائه شده است. این مدل‌ها کاربردهای گسترده‌ای دارند و همگی بر اساس جنبه‌های مختلف ظرفیت‌ها

۴-۲-۱- شبکه عصبی فید فوروارد (FFNN)

شبکه عصبی پیشخور اولین و اساسی ترین نوع شبکه عصبی مصنوعی است. اطلاعات در این شبکه صرفاً در یک جهت جریان دارد: رو به جلو. اطلاعات از گره‌های ورودی (نورون‌ها) منشاء می‌گیرند و از طریق لایه‌های پنهان به گره‌های خروجی می‌روند. همانطور که قبلاً گفته شد، این شبکه هیچ فاصله یا حلقه‌ای ندارد. جریان داده در شبکه عصبی فید فوروارد یک طرفه است. یک شبکه عصبی پیشخور معمول در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

می‌کند تا بتواند رفتار مناسبی از خود نشان دهد. بررسی فرآیند یادگیری در مغز انسان نشان می‌دهد که در حقیقت، انسان‌ها فرآیند مشابهی را در مغز خود طی می‌کنند و تمام توانایی‌ها، دانش و خاطرات آنها نتیجه ضعیف‌تر یا قوی‌تر شدن اتصالات سلول‌های عصبی مغز است. این تقویت و تضعیف با تنظیم یک پارامتر (به نام وزن) به صورت ریاضی بیان و مشخص می‌شود. واضح است که این مطالعه آموزش شبکه‌های عصبی را توضیح نمی‌دهد، و توصیه می‌شود که از وانگ (Wang, 2003) و دموت و بیل (Demuth and Beale, 2000) به عنوان منابع بیشتر مشاوره گرفته شود.

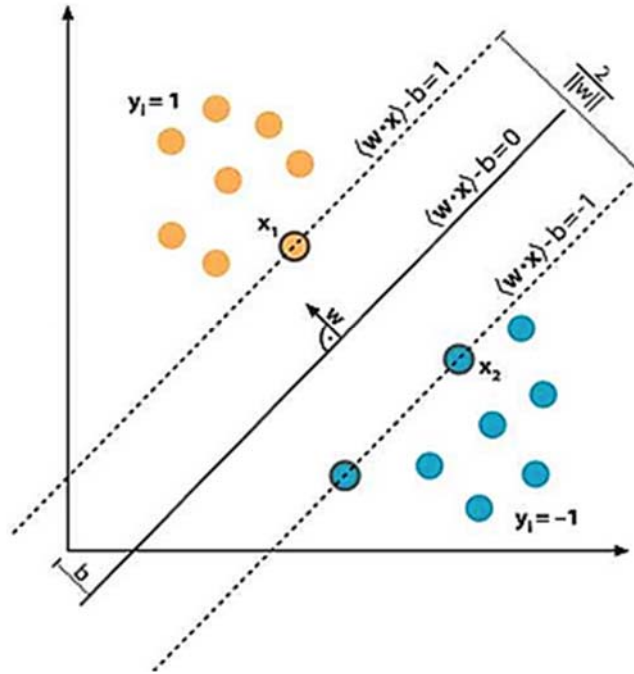


شکل ۱۰. یک شبکه عصبی پیشخور

۴-۲-۲- شبکه‌های عصبی پایه شعاعی (RBNN)

می‌گیرند و سریع‌تر آماده می‌شوند. در واقع، به دلیل تمرکز نورون‌ها در یک ناحیه عملکردی خاص، مدیریت آنها ساده‌تر خواهد بود. یک شبکه عصبی مبتنی بر شعاعی معمولی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

مدل‌های دیگر شبکه‌های عصبی شبیه شبکه‌های عصبی MLP هستند که در آن واحدهای پردازش موقعیت خاص هستند. برای شبیه‌سازی این تاکید، از توابع پایه شعاعی یا RBF استفاده می‌شود. تنها نوع پردازش نورون‌ها بر روی ورودی‌های خود بین شبکه‌های عصبی RBF و شبکه‌های MLP از نظر معماری کلی متفاوت است. از سوی دیگر، شبکه‌های RBF اغلب یاد



شکل ۱۱. شبکه عصبی پایه شعاعی

روش بهتری را برای شبکه‌های عصبی بر اساس رگرسیون ناپارامتریک نشان می‌دهد. هر نمونه آموزشی قرار است نشان دهنده یک نورون پایه شعاعی باشد.

۳-۲- جداول متغیرهای ورودی و خروجی

نتایج آزمایشگاهی بدست‌آمده در این بخش با توجه به ظرفیت بارگذاری نهایی، خروجی نهایی و ورودی پارامترهای مؤثر دسته‌بندی می‌شوند. نرم‌افزار متلب برای آموزش نتایج آزمایشگاهی از مراحل اولیه تحت مدل‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. این امر امکان تعیین الگوی رفتاری مناسب برای نتایج تولید شده و سنجش اهمیت هر پارامتر را ممکن می‌سازد. چهار تکنیک شبکه عصبی مصنوعی برای دستیابی به اهداف این بخش به کار گرفته شده است و نتایج پیش‌بینی هر تکنیک با تکنیک‌های دیگر در تضاد است. جدول ۲ نمونه‌ای از طبقه بندی ورودی و خروجی بدست آمده از یافته‌های آزمایشگاهی ستون سیمانی را نشان می‌دهد.

۴-۲-۳- سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر سیستم فازی تاکاگی ساگنو ANFIS, Takagi-Sugno نامیده می‌شود. اوایل دهه ۱۹۹۰ شاهد ایجاد این تکنیک بود. این سیستم می‌تواند از قابلیت‌های شبکه‌های عصبی و اصول منطق فازی در یک فریم استفاده کند زیرا آنها را یکپارچه می‌کند. با توجه به قوانین اگر-آنگاه به صورت فازی تعریف شده است، سیستم استنتاج آن می‌تواند تقریب توابع غیرخطی را بیاموزد (Nedjah & de Macedo, 2005). در نتیجه، مدل ANFIS به عنوان یک تقریب جهانی در مطالعات متعدد در تمام زمینه‌های علمی پیشنهاد شده است.

۴-۲-۴- شبکه عصبی رگرسیون عمومی (GRNN)

شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته جایگزینی برای شبکه‌های عصبی مبتنی بر شعاعی است. اسپیچت مدل GRNN را در سال ۱۹۹۱ پیشنهاد کرد (Specht, 1991) که می‌تواند برای طبقه بندی، رگرسیون و پیش‌بینی اعمال شود. همچنین ممکن است یک درمان مفید برای سیستم‌های آنلاین پویا باشد. GRNN

جدول ۲. نمونه‌ای از طبقه بندی ورودی و خروجی برگرفته از نتایج آزمایشگاهی ستون‌های سیمانی

No.	Input			Output		No.	Input			Output	
	GT	DT	Load (kN)	s (mm)	GT		DT	Load (kN)	s (mm)		
1	1	0	0.07	0.06	30	1	19.88	9.16	10.00		
2	1	0	0.16	0.14	31	0	0	1.35	4.54		
3	1	0	0.33	0.30	32	0	0	1.36	4.70		
4	1	0	0.63	0.62	33	0	0	1.37	4.86		
5	1	0	0.77	0.78	34	0	0	1.37	5.02		
6	1	4.98	1.74	1.58	35	0	0	1.37	5.18		
7	1	4.98	1.87	1.74	36	0	0	1.38	5.34		
8	1	4.98	1.99	1.90	37	0	4.98	2.57	7.18		
9	1	4.98	2.10	2.06	38	0	4.98	2.62	7.50		
10	1	4.98	2.31	2.38	39	0	4.98	2.67	7.82		
11	1	4.98	2.49	2.70	40	0	4.98	2.72	8.14		
12	1	4.98	2.66	3.02	41	0	4.98	2.77	8.46		
13	1	9.87	3.78	3.66	42	0	4.98	2.82	8.78		
14	1	9.87	3.98	3.98	43	0	9.87	3.41	8.10		
15	1	9.87	4.17	4.30	44	0	9.87	3.70	8.64		
16	1	9.87	4.35	4.62	45	0	9.87	3.97	9.17		
17	1	9.87	4.52	4.94	46	0	9.87	4.22	9.71		
18	1	9.87	4.69	5.26	47	0	9.87	4.45	10.24		
19	1	9.87	4.84	5.58	48	0	14.78	0.00	5.69		
20	1	14.78	7.18	10.00	49	0	14.78	0.00	4.89		
21	1	14.78	0.00	9.77	50	0	14.78	0.00	4.08		
22	1	14.78	0.00	9.32	51	0	14.78	0.00	3.34		
23	1	14.78	0.00	8.40	52	0	14.78	0.00	3.34		
24	1	14.78	0.00	6.54	53	0	19.88	0.00	7.80		
25	1	19.88	7.09	7.18	54	0	19.88	0.00	7.36		
26	1	19.88	7.56	7.82	55	0	19.88	0.00	7.13		
27	1	19.88	8.03	8.46	56	0	19.88	0.00	6.68		
28	1	19.88	8.50	9.10	57	0	19.88	0.00	6.23		
29	1	19.88	8.97	9.74							

*DT: نسبت سطح ستون‌های سیمانی به سطح فونداسیون فوقانی

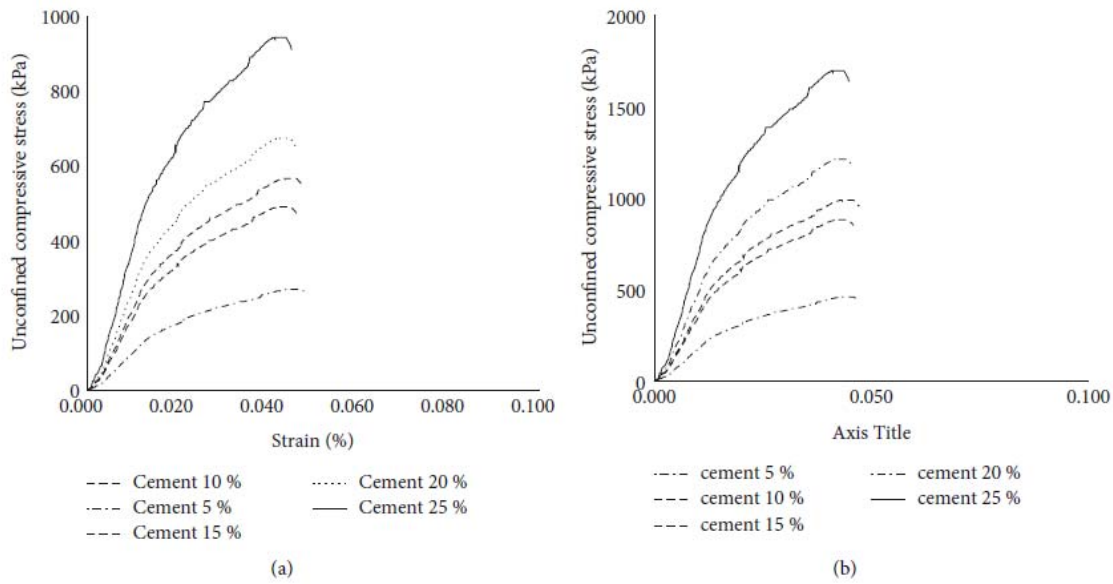
GT نماد ژئوتکتستایل است و وجود کلاهک ژئوتکتستایل با عدد ۱ و عدم وجود کلاهک ژئوتکتستایل با عدد ۰ نشان داده می‌شود.

۵- نتایج و بحث

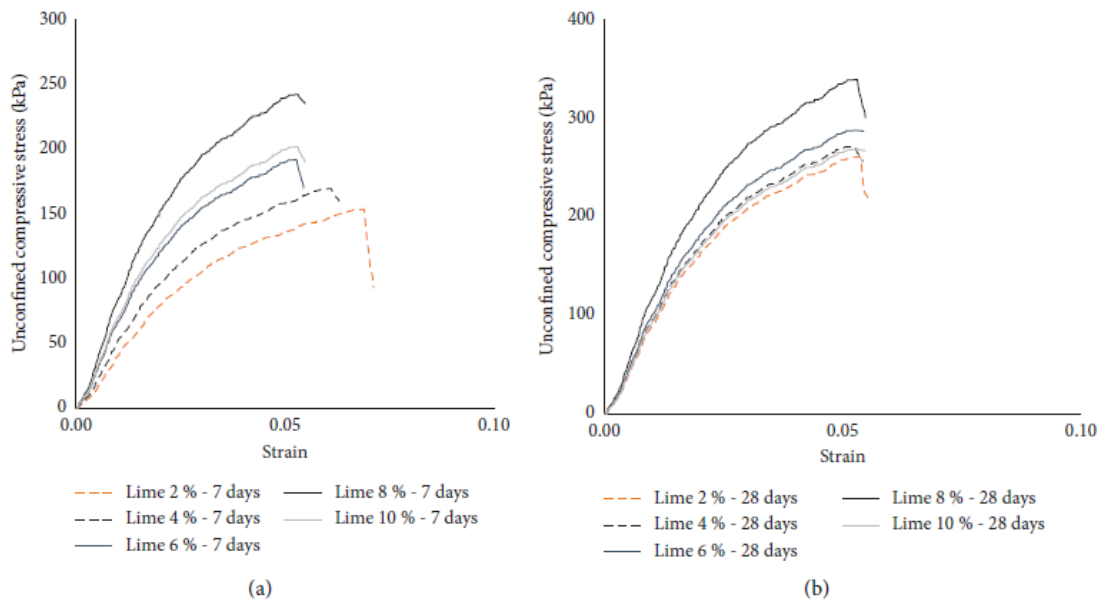
این بخش یافته‌های حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی و بررسی مدل‌های شبکه عصبی پیشنهادی ارائه شده است. مقایسه نتایج ظرفیت باربری برای آزمایشهای آزمایشگاهی تثبیت خاک بزرگ مقیاس با استفاده از نمودارهای بار-نشست ستون سیمانی نشان داده شده است. سپس نتایج شبکه‌های عصبی مصنوعی به کار گرفته شده در این مطالعه ارائه شده است و به بحث، مقایسه و ارائه نتایج و بررسی علل اولیه اختلاف نتایج پرداخته شده است.

۵-۱- نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی تثبیت خاک

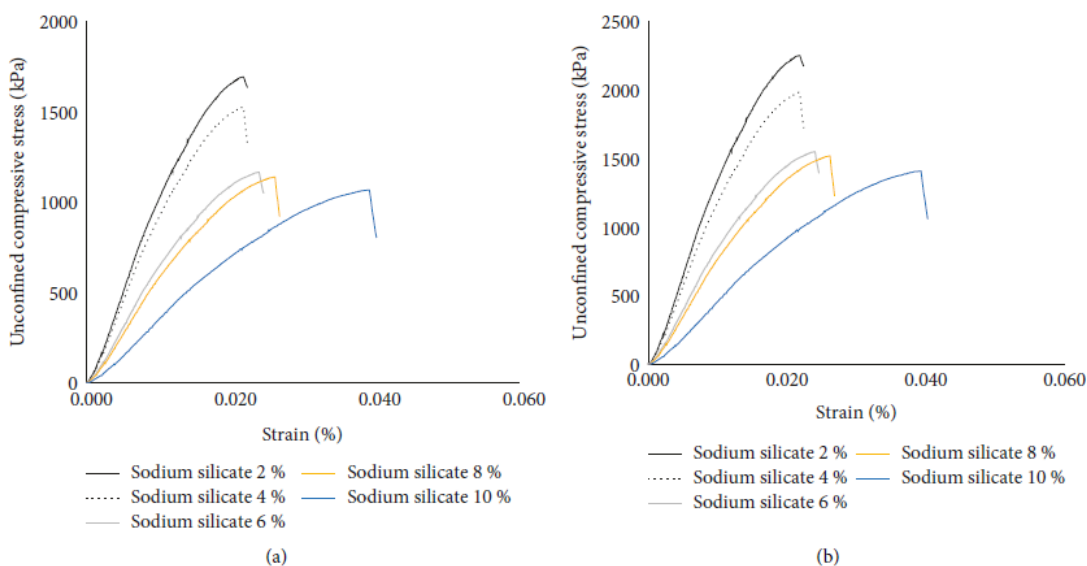
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج آزمایشات تراکم خاک و مقاومت تک محوری را با درصد‌های مختلف سیمان و آهک بترتیب پس از ۷ و ۲۸ روز بعمل آوری نشان می‌دهد. به همین ترتیب، پس از اختلاط درصد‌های مختلف سیلیکات سدیم، شکل‌های ۱۴ و ۱۵ درصد مناسب سیمان و آهک و نتایج آزمایش تراکم خاک تک محوری را نشان می‌دهد.



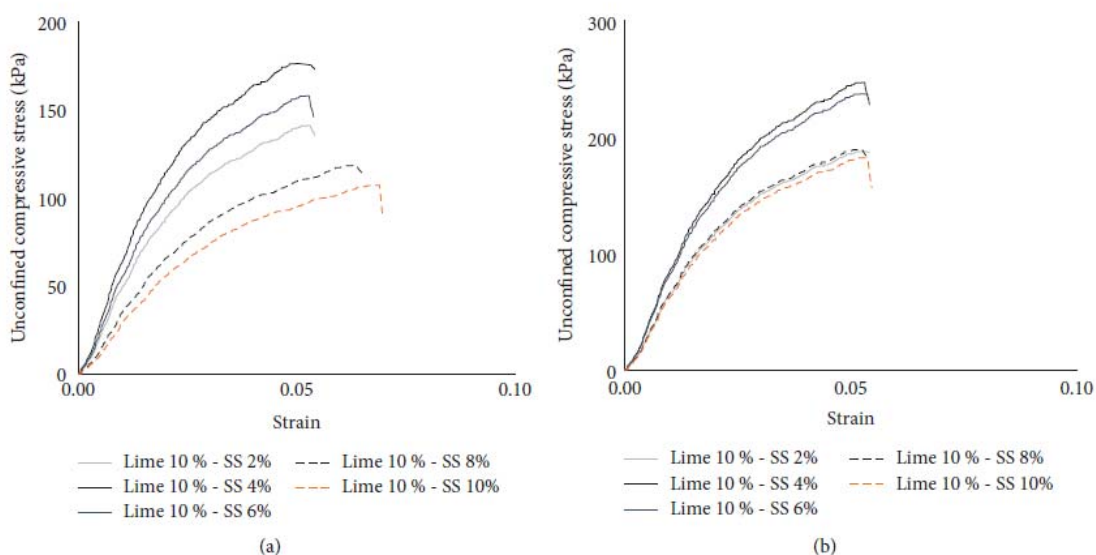
شکل ۱۲. نتایج آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با درصد های متفاوت سیمان



شکل ۱۳. نتایج آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری نمونه های خاک تثبیت شده ۷ و ۲۸ روزه با درصد های مختلف آهک



شکل ۱۴. نتایج آزمایشات مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با ۲۵ درصد سیمان و درصدهای متفاوت سیلیکات سدیم



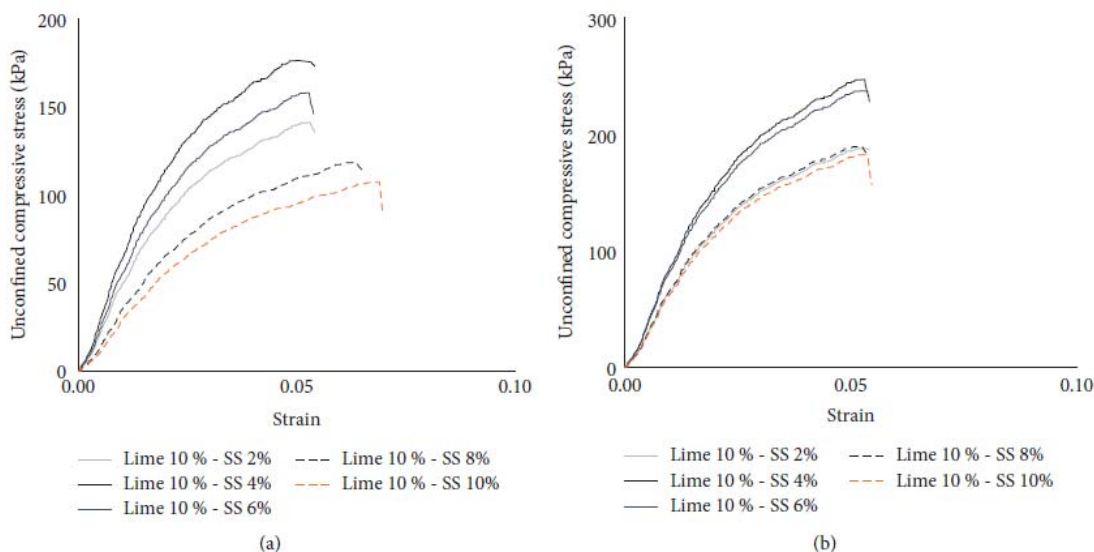
شکل ۱۵. نتایج آزمایشات مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با ۱۰ درصد آهک و درصدهای متفاوت سیلیکات سدیم

شدند، به این ترتیب نویسنده در ابتدا نتایج نمونه‌های ۷ روزه را برای اختلاط با آهک که ارائه نشده بود مشاهده کرد. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های شکسته بازسازی شده انجام شد. رویداد مشابهی که منجر به بازسازی نمونه‌ها شد در چند نمونه ۲۸ روزه رخ داد و پس از آن نمونه‌های نشانگر تازه ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفتند. پس از باز کردن نمونه‌ها پس از ۴۸ ساعت در مخلوط خاک، آهک و سیلیکات سدیم، بلورهای سفید ریز

شکل ۱۶ نمایی از نمونه‌های گسیخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. خاک قبل از آزمایش پس از مخلوط شدن با سیمان به مدت هفت و بیست و هشت روز تا حدودی متقبض شده بود. برعکس، هنگام اختلاط خاک مورد آزمایش با آهک، انقباض قابل توجهی در هنگام تهیه و مخلوط کردن نمونه‌ها مشاهده شد. در نتیجه، برخی از نمونه‌ها پس از ۷ روز اختلاط دچار ترک

واکنش بین آهک و سیلیکات سدیم باعث این اتفاق می‌شود. شایان ذکر است، در مقایسه با نمونه‌های آهکی قابل مقایسه، اکثر نمونه‌های مبتنی بر سیمان در طول آزمایش له‌شدگی بیشتری داشتند (ترک‌هایی که با زمان گسیختگی متفاوت بودند).

در قسمت بیرونی نمونه‌ها شروع به رشد کردند. این کریستال‌ها با افزایش سیلیکات سدیم ۲ تا ۱۰ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، این پدیده در سطوح بسیار پایین سیلیکات سدیم، مانند ۲٪ گزارش شده است. با مقایسه نمونه‌ها به نظر می‌رسد که



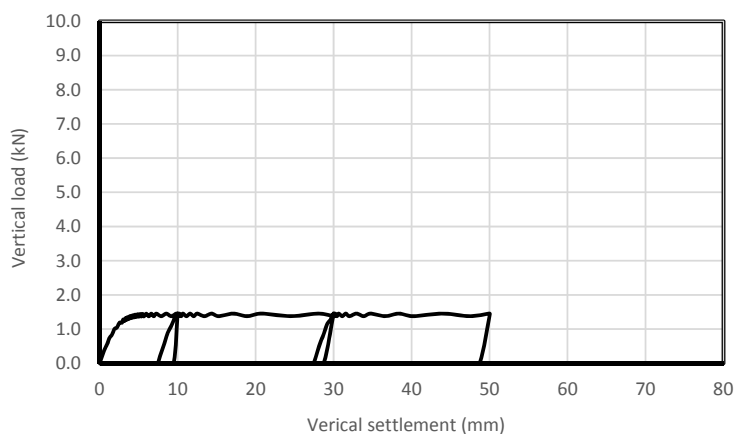
شکل ۱۶. نتایج آزمایشات مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با ۱۰ درصد آهک و درصدهای متفاوت سیلیکات سدیم

در چهار حالت گسترده نشان داده شده است تا مقایسه بهتر نتایج با یکدیگر را تسهیل کند. نمودار بار - نشست خاک پایه بصورت شکل ۱۷ است. نمودار بار - نشست خاک تثبیت شده با ستون سیمانی و بدون کلاهی ژئوتکستایل در شکل ۱۸ نمایش داده شده است.

۵-۱-۱- نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بزرگ

مقیاس ظرفیت بار ستون‌های اختلاط عمیق

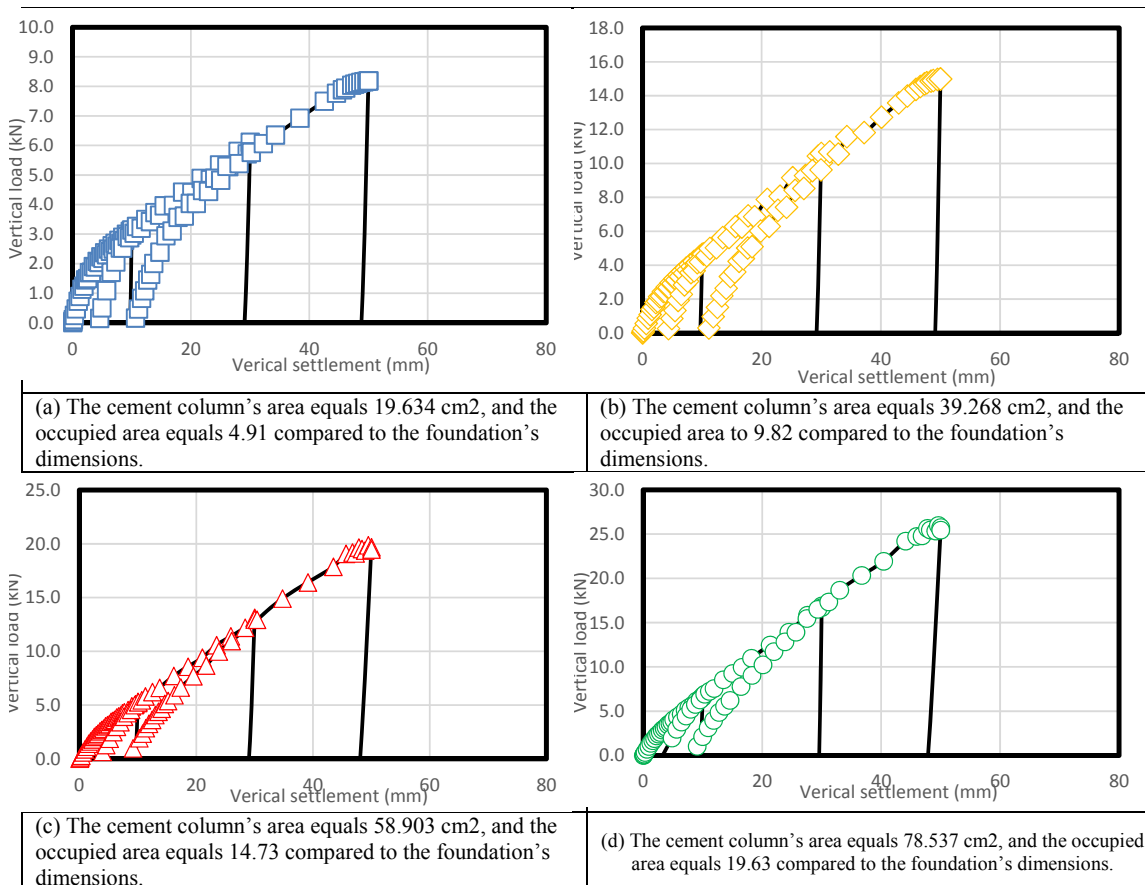
نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی گسترده در مورد قابلیت بارگذاری ستون‌های اختلاط عمیق بصورت زیر ارائه می‌شود. تمامی نتایج در این قسمت بصورت نمودارهای بار-نشست و



شکل ۱۷. نمودار نشست-بار خاک تثبیت نشده

(ج) مساحت ستون سیمانی برابر با $۵۸/۹۰۳$ سانتی متر مربع و مساحت اشغال شده در مقایسه با ابعاد پی برابر با $۱۴/۷۳$ است.
(د) مساحت ستون سیمانی برابر با $۷۸/۵۳۷$ سانتی متر مربع و مساحت اشغال شده برابر با $۱۹/۶۳$ نسبت به ابعاد پی است.

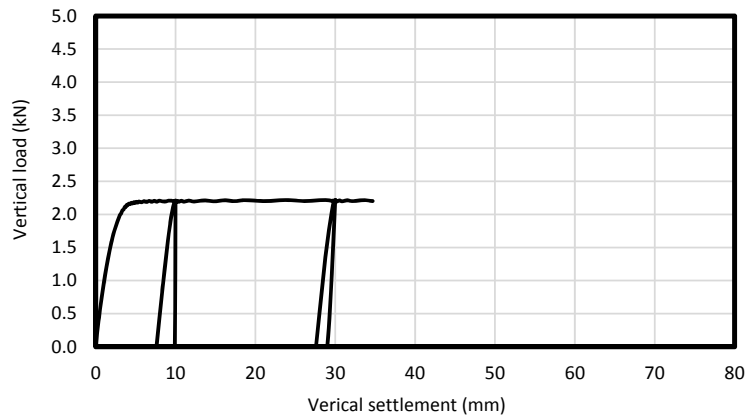
(الف) مساحت ستون سیمانی برابر با $۶۳۴/۱۹$ سانتی متر مربع و مساحت اشغال شده برابر با $۴/۹۱$ نسبت به ابعاد پی است.
(ب) مساحت ستون سیمانی $۳۹/۲۶۸$ سانتی متر مربع و مساحت اشغال شده در مقایسه با ابعاد پی برابر با $۹/۸۲$ است.



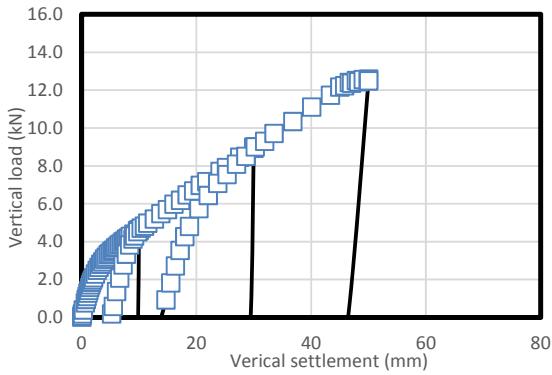
شکل ۱۸. نمودار نتایج بار - نشست خاک تثبیت شده با ستون سیمانی و بدون کلاهک ژئوتکستایل

(الف) مساحت ستون سیمانی برابر با $۱۹,۶۳۴$ سانتی متر مربع و مساحت اشغال شده برابر با $۴/۹۱$ نسبت به ابعاد پی است.
(ب) مساحت ستون سیمانی برابر با $۳۹/۲۶۸$ سانتی متر مربع و مساحت اشغال شده در مقایسه با ابعاد پی برابر با $۹/۸۲$ است.
(ج) مساحت ستون سیمانی $۵۸/۹۰۳$ سانتی متر مربع و مساحت اشغال شده نسبت به ابعاد فونداسیون برابر با $۱۴/۷۳$ است.
(د) مساحت ستون سیمانی $۷۸/۵۳۷$ سانتی متر مربع و مساحت اشغال شده نسبت به ابعاد پی برابر با $۱۹/۶۳$ است.

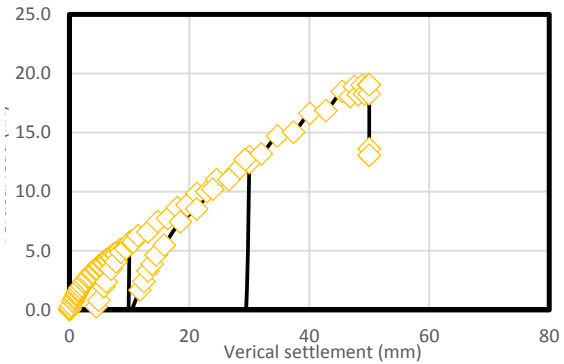
هدف دیگر این مطالعه بررسی تاثیر کلاهک های ژئوتکستایل بر ظرفیت باربری پی های ساخته شده بر روی بسترهای رسی نرم است. در نتیجه، در ادامه طرح تحقیق، نمونه ها در یک جعبه آزمایش در مقیاس بزرگ در آزمایشگاه ایجاد شدند و ستون های سیمانی به درستی در چهار حالت مختلف قرار گرفتند. این بار یک درپوش ژئوتکستایل بر روی ستون های سیمانی قرار داده شد و سپس فرآیند بارگذاری تا رسیدن به حداکثر نشست ۵۰ میلی متر انجام شد. شکل های ۱۹ و ۲۰ زیر نتایج نمودار بار- نشست را برای خاک تثبیت شده با ستون سیمانی و کلاهک ژئوتکستایل نشان می دهد.



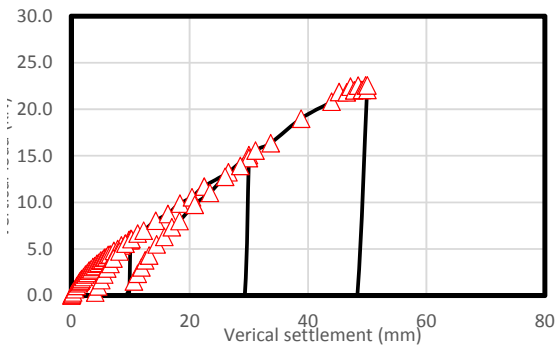
شکل ۱۹. نمودار نشست بار خاک بدون ستون سیمانی و با ژئوتکستایل



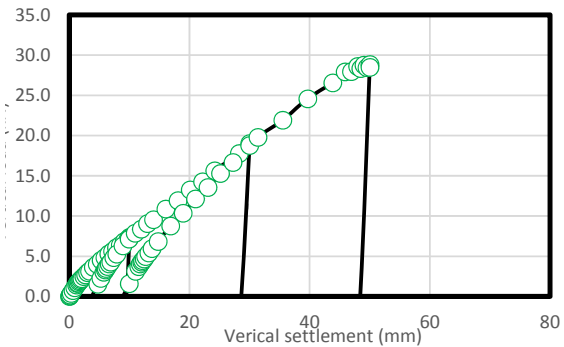
a) The cement column's area equals 19.634 cm^2 and the occupied area equals 4.91 compared to the foundation's dimensions.



b) The cement column's area equals 39.268 cm^2 and the occupied area equals 9.82 compared to the foundation's dimensions.



c) The cement column's area equals 58.903 cm^2 and the occupied area equals 14.73 compared to the foundation's dimensions.



d) The cement column's area equals 78.537 cm^2 and the occupied area equals 19.63 compared to the foundation's dimensions.

شکل ۲۰. نمودار نتایج بار - نشست خاک تثبیت شده با ستون سیمانی و با کلاهک ژئوتکستایل

با ۷۸،۵۳۷ سانتی‌متر مربع (۱۹،۶۳ درصد از کل مساحت اشغال شده ستون در مقایسه با ابعاد پی) باشد و در صورت تغییر شکل مداوم، بار عمودی ۳۰ میلی متر اقدامات برای دو سناریو با و بدون ژئوتکستایل به ترتیب برابر با ۱۴،۷۱ و ۱۸،۹۱ کیلو نیوتن بود. این نشان دهنده افزایش ۲۸ درصدی در بار اعمال شده است. با توجه به مقیاس کوچک مدل و عدم پشتیبانی جانبی برای انتقال صحیح بارهای عمودی، تأثیر ژئوتکستایل به طور معمول به ۲۸٪ محدود شد. طبیعتاً این امر با ابعاد مختلف و قرارگیری مناسب‌تر لایه ژئوتکستایل در زیر فونداسیون بهبود بیشتری خواهد یافت. ستون‌های سیمانی ظرفیت باربری فونداسیون را پشتیبانی می‌کند.

۱-۲- نتایج تحلیل شبکه عصبی مصنوعی در پیش

بینی سکونت

یافته‌های تجزیه و تحلیل با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی در این بخش نشان داده شده است. با استفاده از چهار شبکه آموزش عصبی مجزا، این امر محقق شده است. شکل ۲۱ داده‌های همبستگی را در مورد تجزیه و تحلیل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان می‌دهد. مقدار ضرایب همبستگی (R2) برای شبکه اطلاعات آموزشی و شبکه آزمون بر اساس داده‌های جمع آوری شده و پس از شش تکرار تحلیل محاسبه و در جدول ۳ نمایش داده شد. همانطور که از داده‌ها مشخص است، شبکه عصبی پیشخور با هشت نورون دارای بالاترین مقدار دقت (بزرگترین مقدار ضریب رگرسیون) بود. شکل ۲۲ نتایج کلی شبکه ایده آل را نشان می‌دهد.

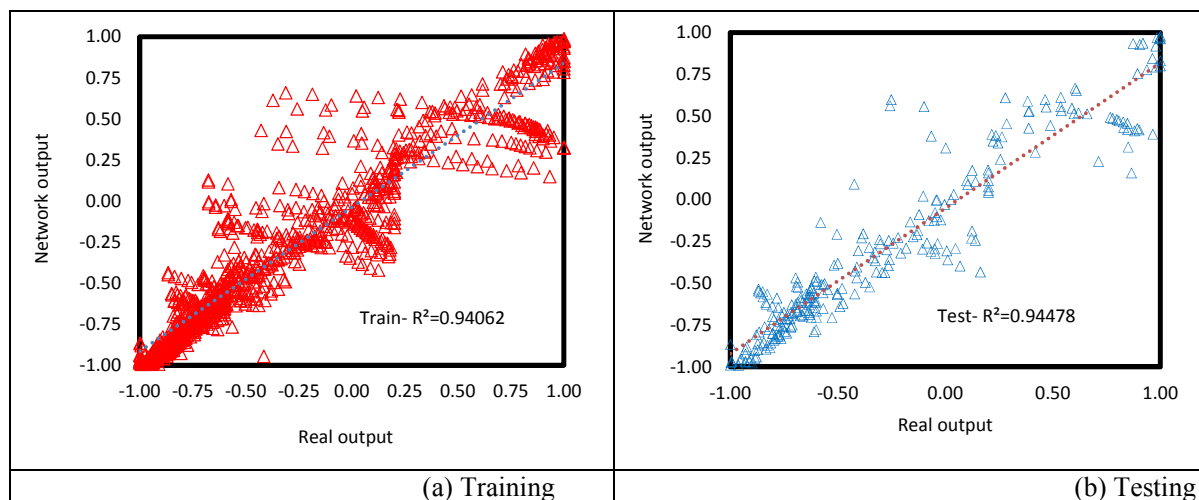
شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ به ترتیب نتایج پیش بینی شبکه‌های ANFIS, RBNN, FFNN و GRNN را نشان می‌دهند. پس از نهایی شدن مقایسه داده‌ها، رویکرد با بالاترین دقت پیش بینی به عنوان یک تکنیک مناسب برای پیش بینی رفتار آن سازه‌ها به نمایش گذاشته می‌شود.

ظرفیت حمل پس از بررسی یافته‌های نمودار بار - نشست برای هر یک از ده حالت آزمایش افزایش یافته است. خاک در ابتدا نشست قابل توجهی را با بار نسبتاً کمی تجربه کرد. به عنوان مثال، حداکثر بار در مورد خاک نرم (یعنی بدون ستون سیمانی و پوشش ژئوتکستایل) معادل ۱/۳ کیلو نیوتن بود. با رسیدن به این محدوده برای هر سیکل بارگذاری، خاک با حداقل مقاومت تغییر شکل می‌دهد. پوشش‌های ژئوتکستایل و ستون‌های سیمانی وجود داشت که ظرفیت حمل را بسیار افزایش می‌داد. به عنوان مثال، هنگام مقایسه حالت غیر ثابت و حالت ثابت با ۹۱،۴، ۹۹،۸۲، ۱۴،۷۳ و ۱۹،۶۳ درصد از سطح پوشش ستون‌های سیمانی - یعنی زمانی که یک، دو، سه یا چهار ستون سیمانی در زیر ستون وجود دارد.

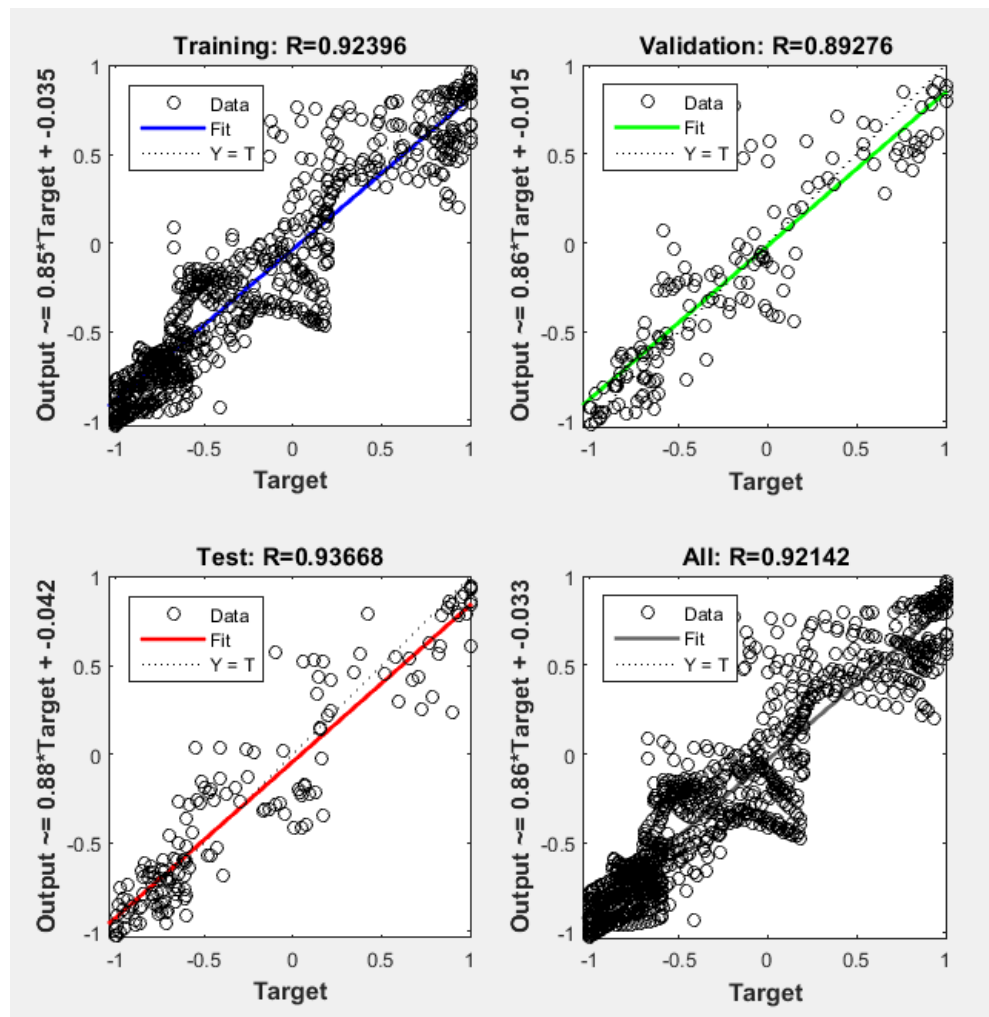
سطح پی - حداکثر بار از ۱،۳۸۴ به ۴،۴۴، ۷،۵۱، ۱۰،۵۸ و ۱۳،۸۸ به ترتیب تحت تغییر شکل ثابت ۲۰ میلی متر افزایش یافت. در نتیجه، ستون‌های سیمانی اختلاط عمیق می‌توانند به طور قابل توجهی (تا حدود ده برابر) ظرفیت باربری پی‌های ساخته شده بر روی پایه‌های نسبتاً سست را حتی در صورت تغییر مکان‌های عمودی افزایش دهند. مرحله دوم تأثیر کلاهک‌های ژئوتکستایل بر تغییرات ظرفیت باربری را بررسی کرد. تأثیر این مشکل بر ظرفیت باربری پی را می‌توان با تضاد نمودارهای بار- نشست تولید شده برای دو سناریو با و بدون ژئوتکستایل بررسی کرد. با توجه به اینکه بیشتر کارایی یک ژئوتکستایل به اعمال نیروهای کششی به جای نیروهای فشاری بستگی دارد و اینکه تکیه گاه ژئوتکستایل بیشتر به مدت مدفون شدن آن در خاک بستگی دارد، باید از دیواره‌های خود پشتیبانی دریافت کند. برای ارائه برخی پشتیبانی، ژئوتکستایل ۵ سانتی متر از بالا قرار داده شد و ۱۰ سانتی متر از طرفین به جای مستقیم روی نمونه‌ها کشیده شد. تکیه گاه می‌تواند نیروهای کششی را که توسط بارگذاری اعمال شده جذب می‌شود، افزایش دهد. بر اساس داده‌های اولیه، وجود کلاهک ژئوتکستایل تأثیری جزئی اما مفید دارد و باعث می‌شود مساحت ستون سیمانی برابر

جدول ۳. جدول تحلیل حساسیت برای تعیین ساختار بهینه آموزش شبکه عصبی پیشخور

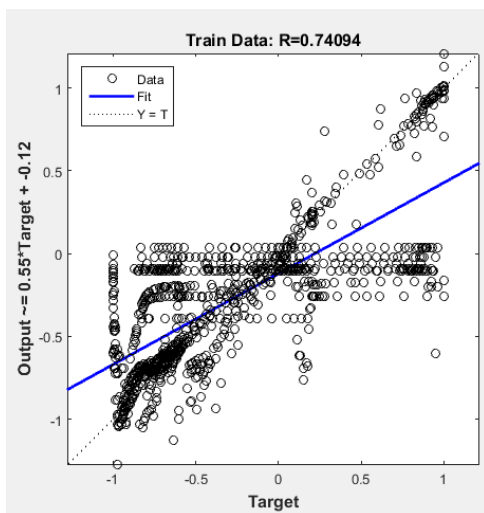
The neuron's number in each hidden layer	Network Results				Scoring				Total Score
	Training		Testing		Training		Testing		
	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	
1	0.80618	0.34936	0.87142	0.32673	1	1	1	1	4
2	0.87860	0.28284	0.88309	0.28996	3	3	2	2	10
3	0.86670	0.29730	0.88548	0.28235	2	2	3	3	10
4	0.92819	0.22277	0.92895	0.21793	6	6	5	5	22
5	0.92267	0.22941	0.91986	0.23713	4	5	4	4	17
6	0.92286	0.23014	0.93540	0.21104	5	4	6	6	21
7	0.94062	0.20374	0.94478	0.19195	7	7	8	8	30
8	0.94143	0.20296	0.93889	0.19845	8	8	7	7	30



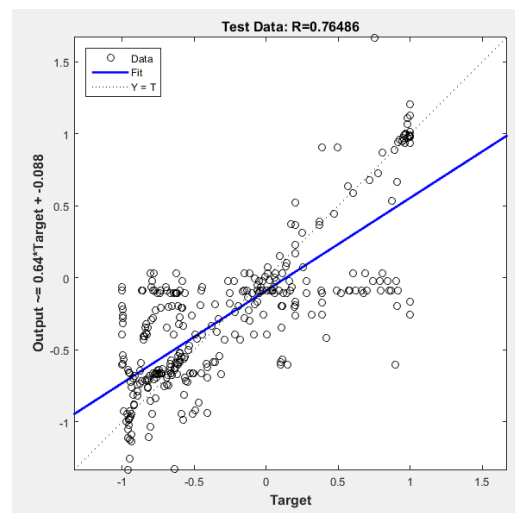
شکل ۲۱. نمودارهای نتایج شبکه عصبی با ۸ نورون تنها در یک لایه پنهان تغذیه



شکل ۲۲. نمودارهای نتایج کلی شبکه عصبی پیشخور بهینه با ۸ نورون



a) Training

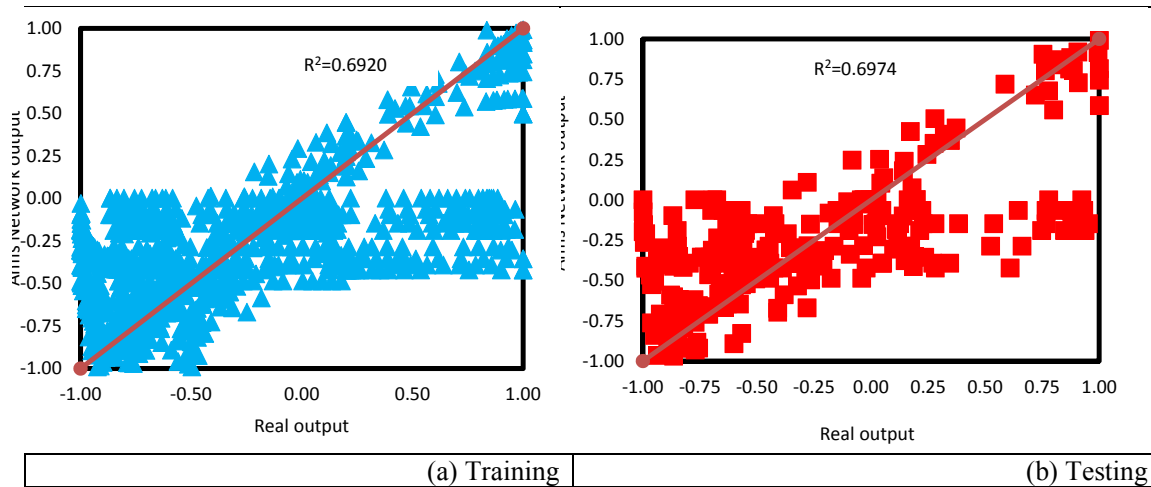


b) Testing

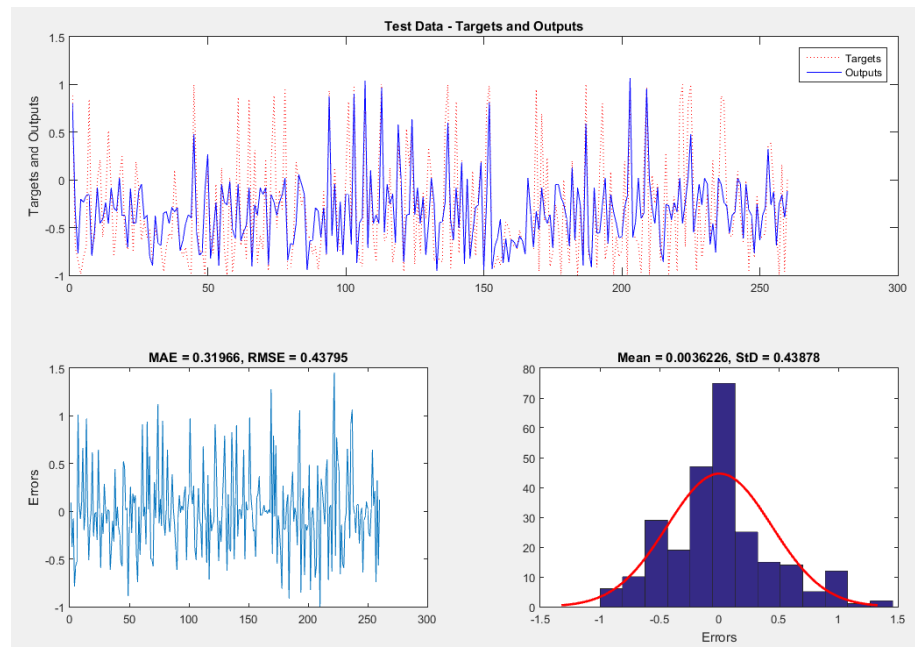
شکل ۲۳. نمودارهای نتایج شبکه عصبی پایه شعاعی

سیستم شبکه عصبی شعاعی، R^2 کمتر از ۰/۵ بود، بنابراین نتایج در اینجا اضافه نشده است.

شکل ۲۴، یافته‌های پیش‌بینی روش سیستم استنتاج عصبی فازی را برای میزان نشست پی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌کند و شکل ۲۵ محدوده خطاهای روش را نشان می‌دهد. نتایج پیش‌بینی شده میزان ته‌نشینی پایه بر اساس روش



شکل ۲۴. نتایج خروجی سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی



شکل ۲۵. خروجی خطاها منجر به یک سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی می‌شود

۲-۵- بحث

معمولاً برای افزایش ظرفیت باربری خاک‌های رسی نرم استفاده

اختلاط عمیق سیمان یک تکنیک بهسازی زمین است که

ANN برای تخمین ظرفیت باربری خاک رس با ستون‌های DCM به شدت به کیفیت و بازنمایی داده‌های آموزشی بستگی دارد. داده‌های کافی و متنوع برای ثبت طیف کاملی از تغییرات در پارامترهای ورودی و ظرفیت‌های باربری متناظر آنها مورد نیاز است. علاوه بر این، باید توجه دقیقی به انتخاب و پیش پردازش متغیرهای ورودی داده شود تا از اطلاعات اضافی یا نامربوط که ممکن است نویز یا سوگیری را وارد مدل کنند، جلوگیری شود.

۶- نتیجه‌گیری

یکی از راه‌های مقابله با خاک‌های نرم، استفاده از ستون‌های سیمانی اختلاط عمیق است. یکی از اهداف اصلی مطالعه در مطالعات تثبیت خاک رسی، تعیین بهترین تکنیک برای استفاده از عناصر تثبیت کننده برای ایجاد یک روش اختلاط مناسب است. بنابراین تغییرات ظرفیت باربری خاک رس توسط ستون‌های اختلاط عمیق سیمان در این تحقیق با بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گسترده با استفاده از تکنیک‌های شبکه عصبی تعیین شد. محله دولت آباد شهر یاسوج واقع در استان کهگیلویه بویراحمد کشور ایران، تمرکز اصلی مطالعه حاضر برای بکارگیری یافته‌ها در برنامه ریزی و توسعه شهری بود. پس از بررسی، نتایج زیر حاصل شد.

- نمودارهای نتایج بار-نشست برای همه ۱۲ مورد آزمایشی، مقدار افزایش قابل توجهی در بار عمودی اعمال شده به پی برای درجه معینی از نشست پی را نشان دادند. حتی در آزمایش‌های انجام شده تحت بارگذاری بسیار زیاد روی پی واقع بر خاک نرم، نشست‌های کمی ایجاد شد. حداکثر بار در آزمایشات برای ستون سیمانی بدون کلاهک ژئوتکستایل برابر ۱/۳ کیلونیوتن بود. با اعمال مقدار بار به این محدوده بارگذاری مقدار خاک پس از حداقل مقاومت در هر چرخه بارگذاری شروع به گسخته شدن و شکم دادگی کرد و شکل‌های متعددی به خود گرفت.

- مقدار ظرفیت باربری برای ستون‌های سیمانی با کلاهک ژئوتکستایل بسیار افزایش یافت. حداکثر بار با وجود یک، دو، سه یا چهار ستون سیمانی در زیر سطح پی از ۱,۳۸۴ بترتیب بصورت ۴/۴۴، ۷/۵۱، ۱۰/۵۸ و ۱۳/۸۸، ۴۴.

در تغییر شکل ثابت ۲۰ میلیمتری در مقایسه بین مناطق غیر ثابت و ثابت مقدار سطح ستون سیمانی بترتیب بصورت ۸۲/۴، ۹/۹۱ و ۱۴/۷۳ و ۱۹/۶۳ درصد افزایش یافت. در نتیجه وجود ستون‌های سیمانی به مقدار بسیار زیاد تا حدود ده برابر می‌تواند مقدار نهایی

می‌شود. این شامل قرار دادن مواد سیمانی در زمین برای ایجاد ستون‌هایی است که استحکام و سفتی خاک را افزایش می‌دهد. برآورد ظرفیت باربری خاک رس با ستون‌های DCM برای طراحی پی و عناصر سازه‌ای بسیار مهم است. شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان ابزاری امیدوارکننده برای پیش‌بینی ظرفیت باربری در چنین سناریوهایی ظاهر شده‌اند. ANN‌ها نوعی الگوریتم یادگیری ماشینی هستند که از ساختار و عملکرد شبکه‌های عصبی بیولوژیکی الهام گرفته شده‌اند. آنها از واحدهای محاسباتی به هم پیوسته‌ای به نام نورون‌ها تشکیل شده‌اند که در لایه‌ها سازماندهی شده‌اند. لایه ورودی داده‌ها را دریافت می‌کند و سپس از طریق لایه‌های پنهان پردازش می‌شود و در نهایت لایه خروجی نتایج پیش‌بینی شده را ارائه می‌دهد. شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند از الگوها و روابط موجود در داده‌های ورودی از طریق آموزش که وزن اتصال بین نورون‌ها را تنظیم می‌کند، بیاموزند.

در زمینه تخمین ظرفیت باربری خاک رس با ستون‌های DCM، ANN‌ها چندین مزیت را ارائه می‌دهند. اولاً، آنها می‌توانند روابط غیرخطی پیچیده بین پارامترهای ورودی و ظرفیت باربری را ثبت کنند. عوامل مختلفی مانند استحکام ستون‌های DCM، خواص خاک و شرایط بارگذاری بر رفتار خاک‌های رسی تأثیر می‌گذارند. شبکه‌های عصبی مصنوعی در یادگیری و مدل‌سازی این روابط پیچیده برتری دارند و آنها را برای پیش‌بینی‌های دقیق مناسب می‌کند. ثانیاً، ANN‌ها می‌توانند حجم زیادی از داده‌ها را مدیریت کنند. تخمین ظرفیت باربری شامل پارامترهای ورودی متعددی مانند قطر ستون، فاصله ستون، خواص رس و بار اعمالی است. روش‌های تحلیلی سنتی اغلب بر ساده‌سازی فرضیات تکیه می‌کنند و دقت آنها را محدود می‌کنند. از سوی دیگر، ANN‌ها می‌توانند مجموعه داده‌های بزرگی را در خود جای دهند و طیف وسیعی از متغیرهای ورودی را در نظر بگیرند که منجر به پیش‌بینی‌های جامع‌تر و قابل اعتمادتر می‌شود. ثالثاً، شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند به خوبی با داده‌های دیده نشده تطبیق داده و تعمیم دهند. پس از آموزش بر روی یک مجموعه داده، ANN‌ها می‌توانند سناریوهای جدیدی را پیش‌بینی کنند و به مهندسان اجازه می‌دهند گزینه‌های مختلف طراحی را بررسی کنند و تأثیر آنها را بر ظرفیت باربری ارزیابی کنند. این سازگاری به‌ویژه در ستون‌های DCM، جایی که ترکیب‌های مختلف ویژگی‌های ستون و شرایط خاک باید ارزیابی شوند، ارزشمند است. با این حال، مهم است که توجه داشته باشیم که موفقیت مدل‌های

-Shen, J. P., Zhang, L. M., Guo, J. F., Ray, J. L., & He, J. Z. (2010). Impact of long-term fertilization practices on the abundance and composition of soil bacterial communities in Northeast China. *Applied Soil Ecology*, 46(1), 119-124.

-Terashi, M., & Kitazume, M. (2011). QA/QC for deep-mixed ground: current practice and future research needs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(3), 161-177.

-Gupta, S., & Kumar, S. (2023). A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4), 129.

-Ter-Martirosyan, A., Sidorov, V., & Sobolev, E. (2022). Dynamic Properties of Soil Cements for Numerical Modelling of the Foundation's Basis Transformed under the Technology of Deep Soil Mixing. A Determination Method. *Buildings*, 12(7), 1028.

-Vervoom, R. R. E., & Barros, A. S. (2021, April). Deep soil mixing for stabilising deep excavations. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, *IOP Publishing*. Vol. 710, No. 1, 012060.

-Amrioui, J., Duc, M., Le Kouby, A., Guedon, J. S., Saussaye, L., Hemmati, S., & Dokladal, P. (2023). Characterization by image analysis of materials heterogeneities produced by the Deep Soil Mixing technique. *Materials Today: Proceedings*.

-Butenko, A. A., Mozgovyi, A. O., Butnik, S. V., & Spirande, K. V. (2022, June). Increasing of strength-rigidity parameters of bases of metallic silos. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, *IOP Publishing*. Vol. 1049, No. 1, 012049.

-Sobolev, E. S., Berezin, E. K., & Kechina, T. V. (2021, June). Comparative analysis of the dynamic stability of a multistorey building with different base arrangements. In *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. Vol. 1928, No. 1, 012018.

-Zuo, J., Wang, B., Li, W., Han, S., Wang, J., & Zhang, F. (2023). Quality assessment and quality control of deep soil mixing columns based on a cement-content controlled method. *Scientific Reports*, 13(1), 4813.

-Chen, J. J., Zhang, L., Zhang, J. F., Zhu, Y. F., & Wang, J. H. (2013). Field tests, modification, and application of deep soil mixing method in soft clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(1), 24-34.

-Tatarniuk, C. (2014). Deep soil mixing as a slope stabilization technique in Northland Allochthon residual clay soil.

-Alipour, R., Khazaei, J., Pakbaz, M. S., & Ghalandarzadeh, A. (2017). Settlement control by deep and mass soil mixing in clayey soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 170(1), 27-37.

-Al-Qaisi, M. S., & Al-Waily, M. J. M. (2022). Experimental Study of Soft Clay Soil Improvement by Deep Mixing Method. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 9(1).

تنش اعمال شده و مقدار ظرفیت باربری پی‌ها را حتی در صورت تغییر در قائم افزایش دهد. قرار دادن ساختمان های بلند را می‌توان بر روی خاک پی‌های بسیار سست را به این روش ساخت.

- نتایج اعمال لایه کلاhek ژئوتکتستایل بر روی ستون‌های سیمانی، مزایای وجود کلاhek ژئوتکتستایل را نشان داد. به طور خاص با مساحت ستون سیمانی برابر با ۷۸/۵۳۷ سانتیمترمربع است که ۱۹/۶۳ برابر بزرگتر از ابعاد فونداسیون عمیق است. در تغییر شکل ثابت ۳۰ میلیمتر، بار عمودی اعمال شده به ترتیب برابر با ۱۸/۳۷ و ۲۴/۵۹ کیلونیوتن در دو مورد با کلاhek ژئوتکتستایل بود که افزایش ۳۳ درصدی در میزان بار اعمال شده را نشان داد. برای استفاده از استحکام کششی این ماده، ۵ سانتیمتر ژئوتکتستایل زیر فونداسیون سطح قرار داده شد.

- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشات بار - نشست با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای هر ۴ مدل مجزا با مقدار همبستگی ۰/۹۴ برای هر دو شبکه آموزشی و آزمایشی، شبکه عصبی پیش‌خور، سطح قابل قبولی از دقت را نشان داد.

۶-مراجع

-Hu, Z., et al., (2003). Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5): 933-948.

-Wang, J., Z. Xu, and W. Wang, (2010). Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(7): 985-994.

-Bunawan, A. R., Momeni, E., Armaghani, D. J., & Rashid, A. S. A. (2018). Experimental and intelligent techniques to estimate bearing capacity of cohesive soft soils reinforced with soil-cement columns. *Measurement*, 124, 529-538.

-Chai, J. C., Carter, J. P., & Hayashi, S. (2005). Ground deformation induced by vacuum consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), 1552-1561.

-Chai, J., Carter, J. P., Miura, N., & Zhu, H. (2009). Improved prediction of lateral deformations due to installation of soil-cement columns. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12), 1836-1845.

-Wang, Z. F., Shen, S. L., Modoni, G., & Zhou, A. (2020). Excess pore water pressure caused by the installation of jet grouting columns in clay. *Computers and Geotechnics*, 125, 103667.

-Fang, Z., & Yin, J. H. (2007). Responses of excess pore water pressure in soft marine clay around a soil-cement column. *International Journal of Geomechanics*, 7(3), 167-175.

- Nugroho, S. A., Fernando, H., & Suryanita, R. (2022). Estimation of standard penetration test value on cohesive soil using artificial neural network without data normalization. *Int. J. Artif. Intell.* ISSN, 2252, 8938.
- Das, B. M. (Ed.). (2011). Geotechnical engineering handbook. *J. Ross publishing*.
- Güllü, H., Canakci, H., & Al Zangana, I. F. (2017). Use of cement based grout with glass powder for deep mixing. *Construction and Building Materials*, 137, 12-20.
- Moayedi, H., Kazemian, S., & Huat, B. B. (2013). Shear strength parameters of improved peat by chemical stabilizer. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31, 1089-1106.
- Farooq, W., Suh, W. I., Park, M. S., & Yang, J. W. (2015). Water use and its recycling in microalgae cultivation for biofuel application. *Bioresource Technology*, 184, 73-81.
- Güllü, H. (2017). A novel approach to prediction of rheological characteristics of jet grout cement mixtures via genetic expression programming. *Neural Computing and Applications*, 28, 407-420.
- Terashi, M. (1999). Deep mixing method-brief state of the art. In *Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proceedings International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 4.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). The deep mixing method (Vol. 21). London, *CRC Press*.
- Warren, A. L. (2011). Investigation of dam incidents and failures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Forensic Engineering*, 164(1), 33-41.
- Lin, K. Q., & Wong, I. H. (1999). Use of deep cement mixing to reduce settlements at bridge approaches. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(4), 309-320.
- Jamsawang, P., Voottipruex, P., Boathong, P., Mairaing, W., & Horpibulsuk, S. (2015). Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and factor of safety of slopes stabilized with deep cement mixing column rows. *Engineering Geology*, 188, 159-167.
- Wang, S. C. (2003). Interdisciplinary computing in Java programming, Vol. 743. *Springer Science & Business Media*.
- Demuth, H.B. and Beale M.H. (2000). Neural network toolbox; for use with MATLAB; computation, visualization, programming; user's guide, version 4. 2000: *Math works*.
- Nedjah, N., & de Macedo Mourelle, L. (2005). Fuzzy systems engineering: theory and practice, Vol. 181. *Springer Science & Business Media*.
- Specht, D.F. (1991). A general regression neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1991. 2(6), 568-576.
- Hadi, D. A. L., & Zaika, Y. (2022). Relationship of Area Ratio to Displacement on Subgrade Stabilized by Deep Soil Mixing. *Rekayasa Sipil*, 16(2), 110-118.
- Szymkiewicz, F., Barrett, A. G., Marino, J. P., Le Kouby, A., & Reiffsteck, P. (2015, June). Assessment of strength and other mechanical properties of the deep mixing material. In *DFI Deep Mixing Conference 2015*, 10-11.
- Helson, O., Beaucour, A. L., Eslami, J., Noumowe, A., & Gotteland, P. (2017). Physical and mechanical properties of soilcrete mixtures: Soil clay content and formulation parameters. *Construction and Building Materials*, 131, 775-783.
- Pourebrahim, F., & Zolfegharifar, S. Y. (2022). Stabilizers Effects Comprehensive Assessment on the Physical and Chemical Properties of Soft Clays. *Shock and Vibration*.
- Esmaeili, M., Astaraki, F., Yaghouti, H., & Rad, M. M. (2021). Laboratory Investigation on the Effect of Microsilica Additive on the mechanical behavior of deep soil mixing columns in saline dry sand. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(4), 1080-1091.
- Sangeetha, J., Dalshica, J., & Nasvi, M. C. M. (2022). Development of Design Guideline for Deep Soil Mixing (DSM) to Stabilize Expansive Soils using Fly Ash as the Stabilizer. *ENGINEER*, 55(01), 123-132.
- Liu, L., Wang, C., Liang, Q., Chen, F., & Zhou, X. (2023). A state-of-the-art review of rubber modified cement-based materials: Cement stabilized base. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136270.
- Almadani, E., & Dehghanian, K. (2022). Numerical Analysis of Soft Soils Reinforced with Deep Mixing Column. *Orclever Proceedings of Research and Development*, 1(1), 240-256.
- Moayedi, H., Mosallanezhad, M., Rashid, A. S. A., Jusoh, W. A. W., & Muazu, M. A. (2020). A systematic review and meta-analysis of artificial neural network application in geotechnical engineering: theory and applications. *Neural Computing and Applications*, 32, 495-518.
- (2018, November). The application of artificial neural network in geotechnical engineering. In *IOP conference series: Earth and environmental science IOP Publishing*, Vol. 189, 022054.
- Sasmal, S. K., & Behera, R. N. (2018). Prediction of combined static and cyclic load-induced settlement of shallow strip footing on granular soil using artificial neural network. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Hosseini, S. A. A., Mojtahedi, S. F. F., & Sadeghi, H. (2020). Optimisation of deep mixing technique by artificial neural network based on laboratory and field experiments. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 14(2), 142-157.
- Agrachev, A., & Sarychev, A. (2022). Control on the manifolds of mappings with a view to the deep learning. *Journal of Dynamical and Control Systems*, 28(4), 989-1008.

Evaluation of Bearing Capacity of Clay Reinforced with Deep Mixing Columns and Geotextile Caps by Large-Scale Experiments & Artificial Neural Networks

*Farzad Pourebrahim, Ph.D., Student, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
Sayed Yaghoub Zolfegharifar, Associate Professor, Department of Civil Engineering and Architecture, Institute of Building Construction and Environment, Yas. C., Islamic Azad University, Yasuj, Iran.*

E-mail: sy.zolfegharifar@iau.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

Soil Deep mixing columns (DSM) is one of the methods to improve the resistance and bearing capacity of soil for the development of urban areas. The purpose of this research was to evaluate the carrying capacity of clay reinforced with deep mixing columns and geotextile caps with large-scale experiments and artificial neural networks. First, the basic technical characteristics of the soil bed were obtained by preliminary laboratory tests, such as granulation type, natural percentage, Etterberg limits, pH, and uniaxial compressive strength. Then, determination of moisture content percentage and optimum chemical additive amount of soil was done by standard compaction tests and uniaxial compressive strength to apply in the construction of deep soil mixing columns in situations without and with geotextile cap. In the second stage of the laboratory tests, load-settlement diagrams were created for each scenario with suitable construction for the laboratory model, different configurations of cement columns and without conditions and with geotextile caps on the cement columns. Laboratory studies showed that the presence of cement columns can increase the bearing capacity of the foundation up to 18 times compared to their absence. The maximum vertical load applied at a constant deformation of 30 mm was equal to 18.37 and 24.59 KN in the cases without and with the geotextile cap, respectively, which showed a 33% increase in the amount of applied load. The artificial neural network for all four separate forms showed an acceptable level of accuracy with a correlation value of 0.94.

Keywords: Artificial Neural Networks, Large-Scale Experiments, Cement Columns, Clay, Deep Soil Mixing